625.13
V27t

L'INGÉNIEUR-CONSTRUCTEUR
DE
TRAVAUX PUBLICS

9e année — Tome VI N° 40 — 15 janvier 1910

TRAVAUX PUBLICS

Chemin de fer électrique souterrain Nord-Sud de Paris

Exécution de la partie de la ligne qui traverse la Seine en amont du pont de la Concorde, au moyen de deux tunnels métalliques circulaires comprenant l'emploi du bouclier et de l'air comprimé (Tube Berlier).

Description générale. — Nous pensons qu'il convient de rappeler, en premier lieu, que la ligne souterraine Nord-Sud de Paris, qui contient le lot dont nous allons uniquement nous occuper, (4e lot), a son origine à la Porte de Versailles et ses points terminus à la Porte de Saint-Ouen, d'une part, et à la place Jules-Joffrin, d'autre part, avec embranchement à la gare Saint-Lazare. Éventuellement, cette dernière ligne pourra être prolongée jusqu'à la Porte de la Chapelle.

Le souterrain doit être construit en maçonnerie, et l'emploi des tunnels métalliques a été réservé exclusivement à la traversée sous la Seine.

Dans cette dernière partie seulement, qui constitue un lot spécial, on a recours à deux tunnels indépendants l'un de l'autre.

54093

Ils sont à voie unique et destinés, l'un à la voie montante, et l'autre à la voie descendante.

Ce lot, actuellement construit, comprend une station en maçonnerie d'un type spécial et les deux tubes réservés à la traversée sous la Seine.

Il commence à la rue de l'Université et prend fin place de la Concorde, au droit de la porte d'entrée du Jardin des Tuileries. Il débouche à cet endroit dans l'ouvrage de raccordement d'une deuxième gare du type spécial.

Cette dernière sera d'ailleurs en communication souterraine avec celle dite « *Place de la Concorde* » de la ligne métropolitaine n° 1, située à une cote supérieure.

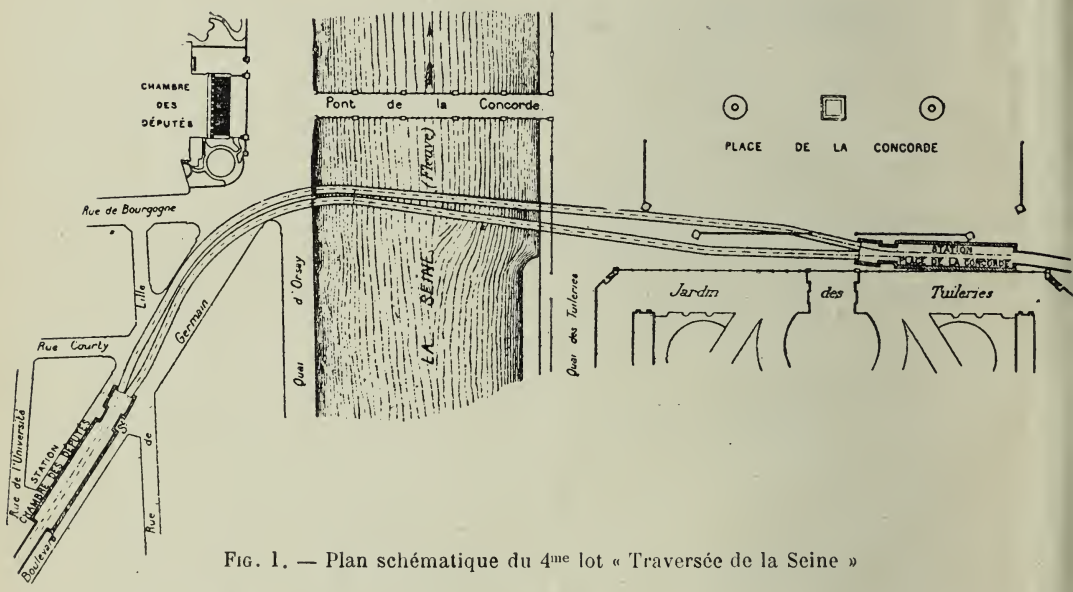


Fig. 1. — Plan schématique du 4me lot « Traversée de la Seine »

Ainsi que le montre le schéma ci-dessus (*fig.* 1), ces stations présentent comme particularité, que chacune d'elles est suivie ou précédée de deux ouvrages de raccordement légèrement en courbe, de façon à permettre l'orientation convenable des voies des deux tunnels. Ces voies pénètrent, en effet, dans les gares, sous un certain angle.

Chaque tunnel, dans la partie tubée, comprend trois courbes de 120 mètres de rayon. La section est circulaire et le diamètre intérieur libre est de 5 mètres (1).

Les raccordements paraboliques sont imposés dans la construction même des ouvrages.

Les déclivités maxima sont de $0^{m}04$ par mètre.

Comme on peut s'en rendre compte sur le profil en long (*fig.* 2), chaque tunnel s'enfonce depuis son origine (boulevard Saint-Germain) avec une pente suffisante ($0^{m}04$ par mètre) pour lui permettre de passer sous la Seine en pleine masse calcaire, à l'abri d'un toit résistant. Il arrive ainsi au point bas où un puisard en béton armé recueille toutes les eaux d'infiltration. Après une contre-pente très légère ($0^{m}0015$ par mètre), sur 75 mètres de longueur, il remonte à la rampe de $0^{m}033$ par mètre jusqu'à l'ouvrage de raccordement de la gare (place de la Concorde).

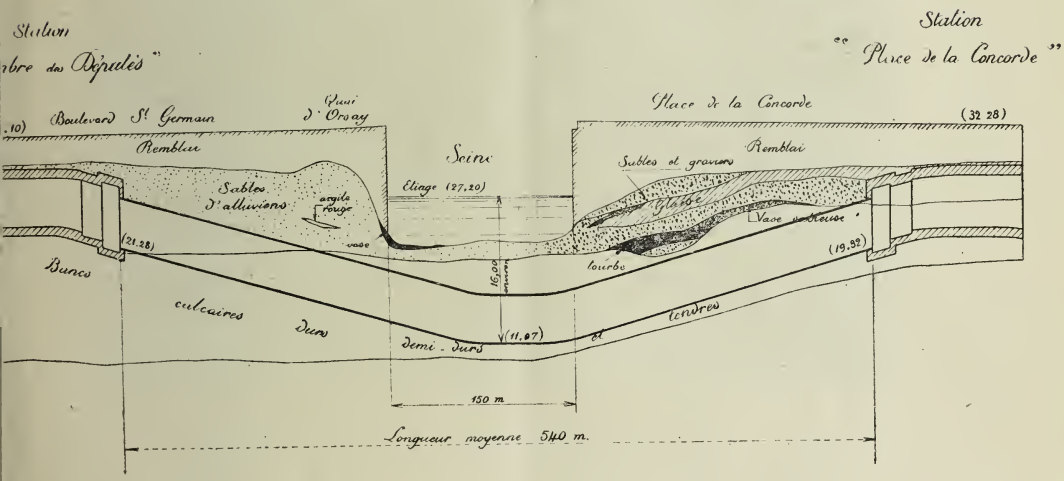


Fig. 2 — Profil en long du 4me lot donnant la coupe géologique

Toute la traversée de la Seine s'effectue dans le rocher, le dessous du tube, au point bas, étant à 16 mètres environ en contrebas du niveau de l'étiage.

(1) Le tunnel est constitué par une succession d'anneaux de fonte boulonnés entre eux. Nous donnerons plus loin les détails de construction de ces anneaux.

Historique. — Avant d'entrer dans les détails d'exécution de ce travail nous ferons, à grands traits, l'historique des procédés employés, en examinant ceux des principaux ouvrages dans lesquels les idées originales ont germé ou ont été complétées ou perfectionnées.

C'est à *Brunel*, un ingénieur français, né à *Hacqueville* (Eure) en 1769 et mort à *Londres* en 1849, que revient l'honneur d'avoir, le premier, mené à bien l'exécution d'un souterrain sous un fleuve, à *Londres*, sous *la Tamise*.

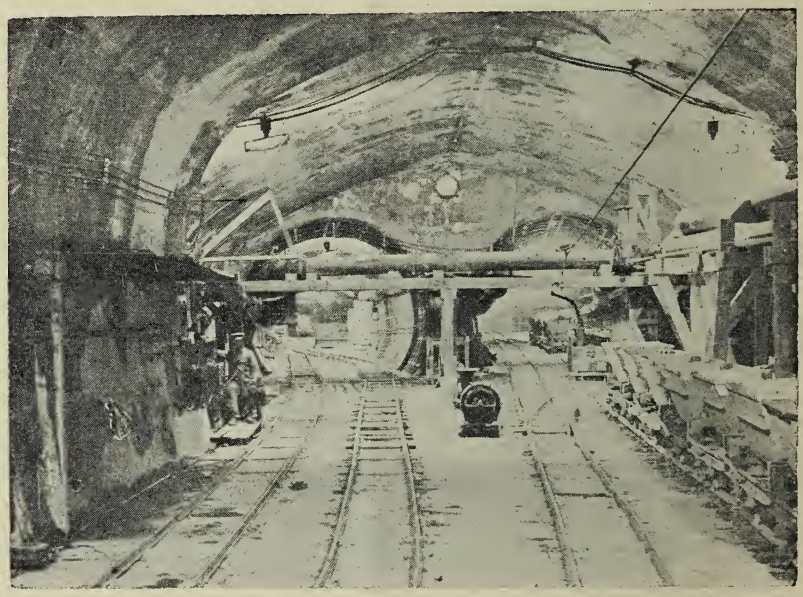


Fig. 3. — Origines des deux tunnels (n° 1 à droite, n° 2 à gauche)
Vues de l'ouvrage de raccordement de la Station « Université »

D'autres avant lui, à *Londres* également : l'ingénieur *Dodd*, secondé par le mineur *Vazie*, auxquels succéda l'ingénieur *Trevilhick*, anglais tous trois, entreprirent de réunir *Gravesend* à *Tilbury* par une communication sous la *Tamise* (1).

(1) La navigation sur la *Tamise*, en aval du pont de Londres principalement, rendant pour ainsi dire impossible l'établissement de ponts fixes et l'emploi de bacs, les ingénieurs anglais se sont depuis fort longtemps préoccupés de réunir les deux rives du fleuve par une communication souterraine.

Les premiers essais, tentés en 1798, après mille péripéties et plusieurs accidents graves aboutirent à un échec.

La galerie d'avancement, conduite jusque sous le fleuve, rencontra une couche de sable mouvant. A la suite d'éboulements successifs, l'eau fit irruption dans cette galerie et la remplit en quelques minutes. C'est par miracle que, seuls, un ouvrier et l'ingénieur parvinrent à s'échapper. Une cheminée s'était formée établissant une communication directe entre le tunnel et le fond du lit.

Tout fut tenté pour permettre la reprise du travail. Des sondages furent exécutés, la cheminée bouchée avec des sacs d'argile et d'autres matériaux, et la galerie mise enfin à sec.

Le toit qui avait cédé mesurait cependant, à cet endroit, 25 pieds ($7^{m}62$) d'épaisseur. Il fut reconnu absolument impossible d'aller plus loin sans disposer de moyens propres à contenir le terrain que l'eau désagrégeait rapidement.

Malgré les offres séduisantes de la Compagnie il fallut renoncer à continuer ce travail. Et le projet fut qualifié de chimérique. Rien ne fut plus tenté avant l'intervention de *Brunel*. Stimulées par ces difficultés, les imaginations enfantèrent des procédés plus audacieux, plus bizarres les uns que les autres. Aucun d'entre eux ne fut d'ailleurs essayé tant ils inspiraient peu de confiance.

Brunel, qui avait exécuté un petit passage souterrain aux docks de *Chatham*, vers 1814, avait été frappé par le travail des tarets dans une vieille quille de navire sciée de long.

Ces curieux vers creusent dans le bois de véritables galeries à l'aide d'une tarière dont leur tête est munie. De plus, leur corps secrète au passage une matière qui enduit les parois et forme un revêtement imperméable à l'eau.

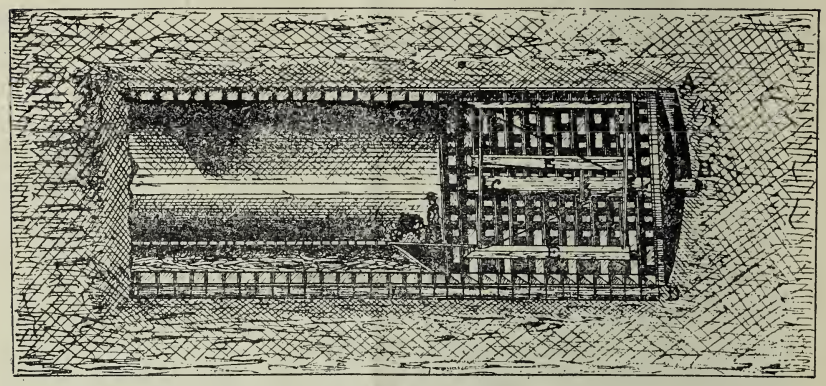
Il n'en fallut pas davantage pour faire jaillir dans l'esprit de *Brunel* la conception presque moderne du bouclier et du revêtement métallique des tunnels.

Il imagina, dès le début, un appareil qui renfermait, en principe, tous les organes essentiels des boucliers employés de nos jours.

Nous reproduisons ici, à titre de curiosité (*fig.* 4 *et* 5), un fac-simile du brevet n° 4.202 qu'il prit en 1818.

Une Compagnie se forma en 1823 pour l'exploitation de ce brevet.

Il s'agissait, à nouveau, de traverser la *Tamise* en souterrain, mais, cette fois, de *Rotherhithe* à *Waping*.



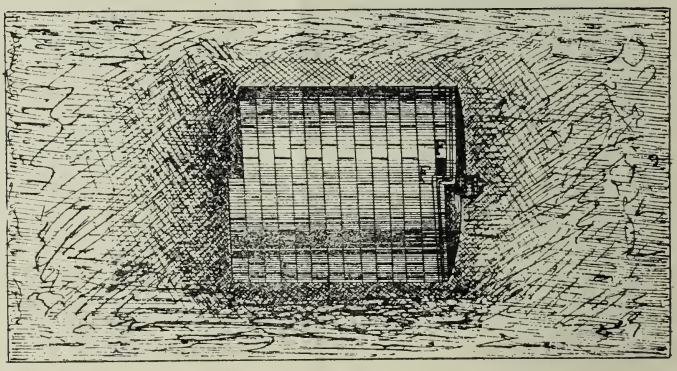


Fig. 4 et 5. — Premier brevet Brunel n° 4.202, pris en 1818

Après l'exécution, de nombreux sondages en rivière, sur deux lignes parallèles à l'axe du souterrain, et qui révélèrent la présence d'une couche d'argile bleue d'épaisseur suffisante pour assurer la sécurité de l'ouvrage, il fut décidé que les travaux seraient entrepris.

Le 16 février 1825, *Brunel* attaqua le puits de *Rotherhithe*. Ses

procédés nouveaux firent sensation. Il avait décidé, en effet, de construire entièrement le cuvelage (1) de son puits sur le fond d'une fouille préalablement préparée, et de faire descendre ensuite tout l'ensemble au fur et à mesure que la fouille s'approfondirait, les parois de cette dernière servant de guidages.

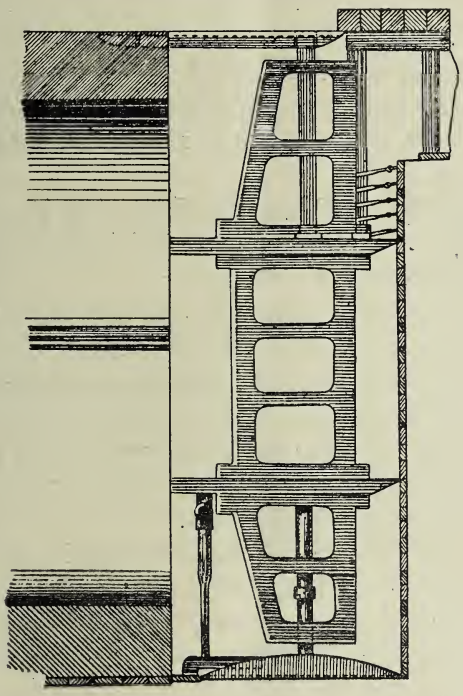


Fig. 6. — Premier bouclier mis en service par Brunel au « Rotherhithe »

Ce puits avait 50 pieds (15m24) de diamètre. Huit mois après, il était parvenu à sa cote, c'est-à-dire à 72 pieds (21m94) de

(1) Le cuvelage du puits était formé par un anneau métallique inférieur taillé en biseau, sur lequel se construisaient les maçonneries. Ces dernières étaient liées par de nombreuses tiges de fer placées verticalement, et qui les traversaient. Sous le poids des maçonneries, le cuvelage descendait et le biseau pénétrait dans le sol.

profondeur, malgré des difficultés de toutes sortes, malgré les sables mouvants et des torrents d'eau.

Du côté de Waping, sur l'autre rive, le puits fut descendu plus tard, mais beaucoup plus vite que le premier, grâce à l'expérience acquise, à 80 pieds ($24^{m}38$).

Nous arrivons à l'attaque du souterrain proprement dit, qui devait relier les deux puits. C'est ici que le premier bouclier créé entra en scène.

A vrai dire, cet appareil était si compliqué dans ses détails que l'on voudra bien nous permettre de n'en faire ici qu'une description un peu générale, afin de rester dans le cadre que nous nous sommes proposé.

Nous en donnons d'ailleurs un schéma (*fig.* 6) qui permettra d'en comprendre le fonctionnement à l'aide de quelques explications seulement.

Il y eut, en réalité, deux boucliers qui se ressemblaient beaucoup. Le premier fut en service jusqu'en 1828, époque à laquelle se produisit un sérieux accident. A la reprise du travail, *Brunel* constata que la plupart des organes de son appareil étaient disloqués. Il en profita pour en faire construire un second qui bénéficia de l'expérience acquise pendant le premier essai. C'est de celui-ci qu'il est question ci-après.

Le bouclier avait pour but de permettre l'avancement sans danger, et aussi la construction des maçonneries du tunnel à l'abri des éboulements, toujours à craindre dans les terrains inconsistants et aquifères.

La carcasse proprement dite était rectangulaire, dans son ensemble, et mesurait 22 pieds 3 pouces ($6^{m}88$) de hauteur, et 37 pieds 6 pouces ($11^{m}43$) de largeur. Elle faisait saillie à environ 9 pieds ($2^{m}74$) en avant de la maçonnerie.

Douze parties distinctes, 12 cadres ou châssis en fonte pour mieux préciser la composaient.

Six de ces cadres supportaient la charge pendant que les six autres étaient poussés en avant.

Chaque cadre était divisé dans le sens de la hauteur en trois cellules par deux planchers métalliques intermédiaires.

Tous les cadres étaient indépendants les uns des autres, et leur mouvement en avant était produit par de très forts vérins

à vis placés à la partie inférieure et à la partie supérieure, prenant appui les uns sur la tranche de maçonnerie de la voûte, et les autres sur celle du radier.

L'avant des planchers était taillé en biseau, de façon à pénétrer dans le terrain par pression.

Restait le blindage des parties attaquées par les mineurs et considérées comme dangereuses.

Toute une série de vis montées sur tiges articulées et terminées par des semelles appropriées permettaient d'appliquer dans tous les sens, aussi bien sur les parois que sur le front d'attaque, un grand nombre de palplanches ou « douves » métalliques et servaient à maintenir les terres.

D'autres vérins à vis verticaux montés sur de larges semelles, au nombre de deux par cadre, rendaient facile le déplacement de l'appareil dans le sens vertical, tout en réagissant contre les sous-pressions, toujours à redouter.

En ce qui concerne l'exécution de la maçonnerie de la voûte : un cintre métallique mobile, réglable en hauteur au moyen d'un levier prenant appui, d'une part, sur la partie arrière d'un plancher de cadre, et, d'autre part, sur la tête d'un vérin à vis, permettait, sans encombrement, de construire la voûte et le corps du tunnel au fur et à mesure de l'avancement du bouclier.

On voit que *Brunel* avait pensé à tout et qu'il avait pris ses dispositions pour lutter avantageusement contre les obstacles naturels qu'il savait rencontrer.

Malheureusement, sa machine était compliquée, et cela se conçoit à une époque où les ressources mécaniques étaient encore très limitées. La manœuvre était délicate, elle exigeait beaucoup de méthode et de précision. Ce fut, pour *Brunel*, la véritable difficulté, celle qu'il n'avait peut-être pas prévue ou contre laquelle il ne put rien. La « négligence et la brutalité des ouvriers » (*sic*) rapport Brunel, qui le secondaient dans la conduite du bouclier, lui firent échec jusqu'à la fin et causèrent plusieurs accidents, dont un fut une véritable catastrophe.

De nos jours, le bouclier s'est transformé, il est devenu plus maniable, mais les ouvriers n'ont pas progressé dans le même sens.

L'avancement régulier ne commença qu'en mars 1826 quand

le bouclier fut sorti des terrains complètement bouleversés par le fonçage du puits. L'assainissement préalable de ces terrains et leur consolidation, qui avaient exigé le creusement de plusieurs autres petits puits, avaient duré près de six mois.

A peine parti, le bouclier dévia : il fallut le ramener dans la direction ; il s'enfonça dans la vase, force fut de le modifier et de l'appuyer sur un plancher ; il se disloqua, on dut en renforcer la plupart des organes.

Tous ces à-coups firent perdre beaucoup de temps. Le terrain changeait aussi de nature et devenait beaucoup plus vaseux. L'avancement exigeait une surveillance constante, et deux ingénieurs, *MM. Gravatt* et *Riley* furent adjoints à *Brunel*. Leur service était si pénible que *M. Riley* mourut bientôt de fatigue.

L'eau devenait de plus en plus abondante et nécessitait déjà l'emploi simultané de 40 pompes à bras, que *Brunel* remplaça plus tard par deux pompes à vapeur.

A la suite d'une erreur commise pendant la manœuvre des vérins de butée qui maintenaient le blindage du front d'attaque, il fallut, pendant 12 heures, lutter désespérément contre l'envahissement du tunnel par la vase. Après avoir cloisonné hâtivement les cellules du bouclier, celui-ci fut abandonné. Il se remplit complètement et l'écoulement de boue s'arrêta.

On voit à quelles graves conséquences pouvait entraîner un oubli sans importance dans d'autres cas.

Quelques jours après, des vaisseaux s'étant mis à l'ancre au-dessus du souterrain, la vase du fond remuée, délayée, laissa passer l'eau en telle quantité dans le tunnel que, cette fois, malgré tous les efforts tentés, celui-ci fut envahi. C'est à grand peine que le personnel parvint à s'échapper.

A l'aide d'une cloche à plongeur, *Brunel* descendit dans la rivière jusque sur le bouclier. Il put se rendre compte que celui-ci était complètement disloqué, mais que, cependant, il était resté en place.

L'excavation fut évaluée à 25.000 pieds cubiques (705^{m^3}).

Elle fut bouchée avec des sacs d'argile coulés au fond en quantité suffisante pour isoler parfaitement le tunnel de la rivière ; le contenu d'un bateau de 250 tonnes d'argile et de sable acheva de la remplir.

De grosses pompes furent mises en batterie et commencèrent à faire baisser le plan d'eau, mais le remblai tassa et l'eau se fit jour à nouveau. Il fallut recommencer.

Enfin, avec de grandes difficultés, le tunnel fut mis à sec et visité. Le bouclier, absolument hors service, fut remplacé par un second plus robuste et plus perfectionné que le premier. C'est celui dont nous avons fait plus haut la description.

Les galeries avaient, à ce moment, une longueur totale de 562 pieds (171^{m}29). L'avancement fut repris. Un mois après il n'avait progressé que de quelques mètres. A l'occasion des fêtes de Noël, le travail fut interrompu, suivant la coutume anglaise, pendant plusieurs jours, et, comme on va le voir, les conséquences de cet arrêt furent désastreuses.

Au moment de la reprise, le 12 janvier 1828, le terrain délayé par l'eau pendant la suspension du travail se mit à gonfler à tel point que, pendant un changement de blindage du front d'attaque, ce dernier creva, donnant passage, par la déchirure, à une énorme quantité de vase et d'eau.

L'irruption fut si violente qu'elle laissa à peine le temps à quelques hommes de descendre les échelles du bouclier et de s'éloigner à toute vitesse.

Quant à ceux qui n'avaient pas quitté leur poste aussitôt l'apparition des premiers indices précurseurs d'éboulement, ils eurent à soutenir une lutte terrible contre la mort. *Brunel*, seul d'entre eux, revit le jour, mais sérieusement blessé ; ses six compagnons furent noyés ou ensevelis dans la boue.

Brunel raconta qu'ils se trouvèrent tout à coup en pleine obscurité. L'agitation de l'air était d'une violence inouie et les lumières furent éteintes ou emportées. Pris dès les premiers instants sous un amas de planches brisées et de matériaux, il fit des efforts surhumains pour se dégager ; lorsqu'il y parvint il avait déjà de l'eau jusqu'aux épaules. Il se mit à la nage et, plutôt chassé par le courant que mû par ses propres moyens, il finit par rencontrer l'escalier de sortie. A ce moment le tunnel était déjà presque rempli. *Brunel* s'était heurté maintes fois aux parois ou à des débris flottants, et c'est couvert de blessures qu'il arriva au jour.

Cet homme énergique venait, une fois de plus, grâce surtout au sang-froid dont jamais il ne s'était départi, de triompher d'une situation presque inextricable.

Sans perdre de temps, il se remit à l'œuvre. A l'aide d'une cloche à plongeur il explora l'excavation. Le lit du fleuve était perforé et le bouclier était à nu. *Brunel* put constater avec satisfaction que les cadres, presque tous disjoints et déplacés, étaient réparables.

De nouveaux bateaux de sacs d'argile furent coulés, qui bouchèrent l'orifice d'écoulement. Les mêmes procédés que précédemment furent employés, le tunnel fut vidé et déblayé et, le 15 août 1828, *Brunel* pouvait écrire « *Le souterrain est terminé sur une longueur de* 600 *pieds* (183 mètres). »

Malheureusement la Compagnie était à bout de ressources ; elle dût suspendre les travaux.

Sept ans plus tard, en 1835, une subvention du Gouvernement permit de rouvrir les chantiers.

Nous ne ferons pas l'énumération des nouveaux dangers qu'il fallut courir, des obstacles toujours imprévus et toujours nombreux qu'il fallut vaincre. Nous ne dirons rien non plus de l'insubordination des ouvriers qui allait sans cesse en croissant et qui faillit compromettre le couronnement de l'œuvre de *Brunel.*

En 1842 tout était terminé et, un an plus tard, le tunnel fut inauguré par *Sir J. Rennie.*

La dépense totale s'élevait à 600.000 livres sterlings (15 millions de francs).

Le bouclier de *Brunel* avait fait ses preuves. Certes, ce n'était pas un outil parfait, mais qui donc oserait rêver d'atteindre à la perfection lorsqu'il s'agit d'inventer un organe, de le créer de toutes pièces et de le mettre en œuvres dans un travail aussi hardi et aussi colossal que celui que *Brunel* avait entrepris et sut mener à bien.

Depuis, les boucliers ont changé de forme, ils ont été simplifiés et rendus plus maniables. Mais il faut songer au temps qui s'est écoulé depuis l'époque où *Brunel* fit et appliqua sa merveilleuse invention. En 90 ans, on a acquis de l'expérience et la mécanique et la métallurgie ont fait d'immenses progrès.

Dans sa conception première, *Brunel* avait entrevu le bouclier

moderne et ses applications aux tunnels à revêtement métallique, mais les moyens de construction lui faisaient défaut.

Quand on songe au génie inventif de cet homme, à l'abondance et à la variété de ses idées, à ses facultés d'assimilation ; quand on étudie son œuvre et qu'on cherche à se représenter ce qu'il lui a fallu d'énergie, de tenacité et de courage pour la réaliser on est saisi d'admiration.

Il serait trop long et hors du sujet que nous nous sommes proposé de traiter de nous étendre aussi longuement que nous venons de le faire sur les nombreux travaux du même genre qui ont été faits jusqu'à nos jours. Nous citerons seulement pour mémoire les principaux d'entre eux qui présentent des particularités ou sont des innovations.

Les difficultés énormes que *Brunel* éprouvait à lutter contre l'eau dans son travail de Rotherhithe et surtout le grave accident qui avait fait des victimes, incitaient les chercheurs à trouver un moyen propre à arrêter les infiltrations.

En 1830, c'est-à-dire pendant la période d'interruption des travaux du tunnel sous la *Tamise*, l'amiral *Lord Cochrane* prit un brevet n° 6.018 dans lequel il exposait le moyen de refouler l'eau avec l'air sous pression (1). A l'aide de ce procédé, disait-il, il serait désormais possible aux ouvriers d'exécuter une fouille ou une galerie sans être gênés par l'eau, à condition de remplir d'air comprimé l'espace dans lequel ils travailleraient.

A l'appui de sa théorie, *Lord Cochrane* donnait des plans et les dessins des appareils qu'il jugeait nécessaires pour réaliser son projet. (Ces appareils comprenaient des écluses à air.)

Quelques années plus tard, en 1839, une première application de ce procédé fut faite en France, à *Chalonnes-sur-Loire*, mais ce n'est que quarante ans après, en 1879, que *M. Hersent* en fit l'application dans une galerie horizontale au Port d'Anvers.

Depuis, l'emploi de l'air comprimé s'est généralisé.

La méthode préconisée par *Lord Cochrane* était excellente, nous en avons aujourd'hui la preuve, mais pour qu'elle pût

(1) On a dit aussi que, dès 1828, l'ingénieur français *Colladon* avait conseillé à *Brunel* de se servir de l'air comprimé pour combattre l'eau.

rendre de réels services en cheminement horizontal, il lui manquait le bouclier cylindrique.

En 1863, un ingénieur anglais, *Peter William Barlow*, combla cette lacune et prit un brevet. Il reprit également, peut-être sans le savoir, l'idée que *Brunel* avait eue, sans avoir pu la réaliser, de l'enveloppe de fonte des tunnels, et chercha une application pour son système.

Il demanda et obtint la concession du tunnel de *Londres* (Tower Subway) en 1868.

A cette occasion, Barlow s'était adjoint un ingénieur, Greathead qu'il avait initié à sa méthode. Nous devons dire à la louange de ce dernier, que c'est lui seul qui dirigea le travail.

Le projet prévoyait un souterrain de 6 pieds 6 pouces ($1^{m}98$) de diamètre intérieur libre, reliant les deux rives de la *Tamise*, de *Towerhill* à *Middlesex*.

Ce fut, heureusement pour l'essai, un travail relativement facile. Les terrains à traverser ne contenaient pas une goutte d'eau, ils étaient entièrement constitués par l'argile de *Londres* (London Clay), et le tunnel fut creusé en pleine masse compacte. L'épaisseur, entre le fond du lit de la rivière et le dessus de la fouille ne fut jamais inférieure à 22 pieds ($6^{m}70$). L'air comprimé ne trouva évidemment pas là son emploi. La longueur totale du souterrain est de 1.350 pieds ($411^{m}47$) ; six mois suffirent pour l'exécuter.

C'est *Barlow* qui, le premier, eut l'idée de remplir les vides laissés par le bouclier entre le terrain et l'extérieur du tube, au moyen d'une injection de mortier liquide.

Greathead en fit une ingénieuse application en se servant, à défaut d'appareil plus complet et plus efficace, d'une énorme seringue à main et de lait de chaux préparé dans un baquet. Hâtons-nous de rappeler à cette occasion que les dimensions de l'ouvrage étaient très réduites.

Le bouclier cylindrique, étudié par *Barlow* et utilisé par *Greathead*, qui l'avait profondément modifié, perfectionné, guidé en cela par l'essai qu'il venait de faire, était désormais un outil pratique et robuste.

Cet ingénieur avait, dit-on, conçu le plan d'un bouclier destiné à traverser des terrains aquifères, et dans lequel une chambre à

air comprimé était prévue. Cette chambre, dont nous donnons le croquis ci-contre (*fig.* 7), était destinée, en cas d'inondation, à maintenir l'eau à l'avancement, et à rendre impossible l'envahissement du tunnel. Cette idée a d'ailleurs été reprise et mise en pratique par les Américains.

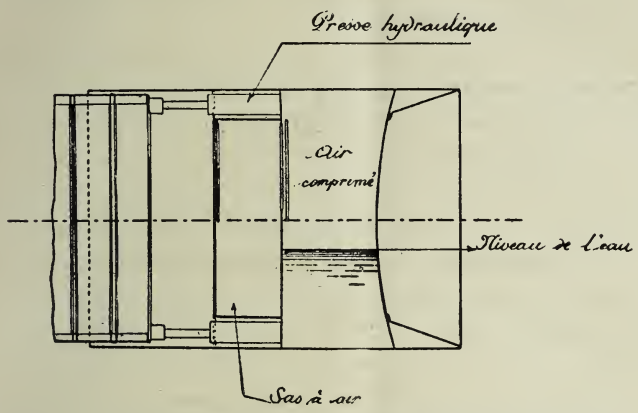


Fig. 7. — Bouclier pour terrains aquifères (Système Greathead) avec chambre à air comprimé

Greathead préconisait également l'emploi de presses hydrauliques pour remplacer les vérins à vis servant à produire l'avancement du bouclier.

Nous tenions à bien préciser ces divers points afin de faire remonter, selon toute justice, les innovations heureuses et pratiques, qui ont pris corps dans la suite, à leurs véritables auteurs.

Pendant qu'en Angleterre on se livrait, avec quelque succès, aux travaux que l'on connaît, les Américains ne restaient pas inactifs.

M. Beach, qui avait eu connaissance des résultats obtenus par *Greathead*, à *Londres*, créait un bouclier qui semblait réaliser ce que ce dernier avait conçu.

Son appareil était cylindrique. Il était formé de pièces de bois reliées par des armatures métalliques, et le tout était cerclé de fer.

L'avant, c'est-à-dire la partie en contact avec le front d'attaque, était formé d'une couronne de fonte taillée en biseau et destinée à pénétrer dans le terrain. Les vérins étaient hydrauliques et alimentés par une pompe à bras. Ils étaient répartis uniformément sur la tranche arrière du bouclier, et, prenant appui sur la partie du tunnel déjà construite, permettaient de chasser le bouclier en avant.

M. Beach en fit l'application à *New-York* pour la construction du « **Broadway pneumatic undergzound Railway** », un souterrain de 8 pieds ($2^{m}44$) de diamètre intérieur, entièrement en maçonnerie de briques et de ciment.

Broadway est une des rues de *New-York* où la circulation est la plus intense et le tunnel devait traverser, complètement à sec il est vrai, des sables très meubles et des graviers au-dessous des égouts et de nombreuses conduites de gaz et d'eau. Le travail réussit parfaitement et le 26 février 1870 le « **tube** » était livré au public.

Les wagons circulaient dans ce tube sous la pression de l'air que l'on comprimait dans une station attenant à une salle d'attente.

Ce mode de locomotion, original pour l'époque, valait bien d'être mentionné.

A peu près au même moment, et toujours à l'aide du bouclier *Beach*, on construisit à *Cincinnati* (Ohio) un égoût circulaire de 8 pieds ($2^{m}44$) intérieur.

Ce travail se fit à sec et dans d'excellentes conditions.

En 1869, l'ingénieur *Whitelaw* essaya du même procédé pour l'exécution d'un projet de grande envergure, mais cette fois ce fut sans succès.

Il s'agissait d'alimenter en eau la ville de *Cleveland*, en bordure du lac Érié, en faisant une prise sous ce lac au moyen d'un puits, et en conduisant les eaux jusque dans la ville, par l'intermédiaire d'un souterrain de 6.606 pieds (2.013 mètres) de longueur. « **Cleveland lake tunnel.** »

Commencé dans de bonnes conditions, cet aqueduc s'acheva à grand peine, après beaucoup de mécomptes et de nombreux arrêts.

Le bouclier, mal entretoisé, céda sous la pression de l'argile

molle (environ 39.000 kil. par mètre carré), il s'aplatit de $0^{m}10$ — il dévia — et s'enfonça.

Les ingénieurs et les entrepreneurs américains déconcertés et rebutés par toutes les difficultés qu'ils prétendaient inhérentes à cette méthode de travail, se promirent d'en abandonner pour longtemps l'emploi. Ce ne fut que plus tard, sous l'Hudson, que le bouclier fit sa réapparition.

Le souterrain sous l'Hudson était destiné à mettre directement en rapport la ville de *New-York* avec les nombreuses lignes de chemins de fer qui aboutissent à *New-Jersey*, sur l'autre rive, par des moyens plus rapides que les ferry-boats, dont on connaît les inconvénients. A l'endroit projeté le fleuve mesure environ 1.600 mètres de largeur, et sa profondeur maximum atteint 21 mètres. Il roule sur un lit de vase extrêmement épais, qui repose, du côté de *New-York*, sur une couche de gros sable et un banc de gravier. C'est dans ce terrain qu'est logé le tunnel.

On peut dire que ce travail, l'un des plus importants du genre, a été une école d'application dans laquelle tous les procédés connus jusqu'alors ont été essayés.

Le temps mis pour l'exécution, de 1879 à 1889, donne une idée des difficultés qu'il a fallu vaincre.

Il faut reconnaître, cependant, que les tâtonnements sans nombre et surtout la persistance des Américains à ne plus vouloir employer le bouclier ont été les véritables causes du retard.

Les essais, commencés en 1874, furent interrompus par un procès, et ce n'est qu'en 1879 que les travaux furent réellement mis en train.

Il faudrait un livre pour décrire en détail la marche de ce travail et les changements de méthode nécessités par les obstacles rencontrés au fur et à mesure de l'avancement. Les limites restreintes de notre sujet nous obligent à n'en dire que quelques mots.

Un puits fut creusé du côté de *Jersey* et blindé au moyen d'un revêtement métallique. Dès que l'on eût atteint le niveau de l'eau, il fallut recourir à l'air comprimé, et un sas fut installé.

C'est véritablement là que le procédé fut employé en grand pour la première fois. Malheureusement, le peu d'expérience du personnel, mal initié encore et aussi quelque peu négligent, causa

la mort d'une vingtaine d'hommes à la suite d'un envahissement du tunnel par la rivière.. Après toutes sortes de tentatives restées infructueuses pour retirer les corps, il fallut descendre un caisson. Le tunnel à peine engagé sous la rivière et complètement noyé dans une vase très molle fut abandonné à cet endroit, faute de moyen permettant d'aller plus loin. Il fut repris cependant puis bientôt arrêté. Enfin, l'emploi du bouclier, reconnu indispensable, fut décidé.

Un bouclier fut étudié spécialement et pourtant il ne donna pas satisfaction. On dut le modifier, le transformer presque complètement, puis, enfin, le remplacer par un autre et le tunnel put être terminé.

Toutes ces difficultés, tous ces déboires devrait-on dire, avaient porté des fruits.

Ils avaient établi définitivement et indiscutablement l'avantage de la méthode du bouclier et de l'air comprimé sur les autres méthodes ; ils avaient montré également qu'en cheminement horizontal l'air comprimé exige le bouclier et le revêtement métallique.

Nous terminons maintenant cet exposé un peu sommaire des origines du bouclier et des organes et accessoires que comporte son emploi, par l'énumération rapide des principaux travaux dans lesquels on eut recours à lui.

En procédant par ordre de succession, ou à peu près :

De 1886 à 1890, à *Londres* :

Le **City and south London Railway** (de *King William street* à *Stockwell* ; deux tunnels superposés — passant sous les voies publiques et les maisons et traversant sous la *Tamise*, à $22^{m}25$.)

C'est dans ce travail que l'on fit, pour la première fois, usage de l'air comprimé pour l'injection de ciment liquide. (Procédé Greathead.)

De 1884 à 1890, aux *États-Unis :*

Le **tunnel Saint-Clair.**

(Ligne de **Chicago and Grand Trunk railway system**, *de Port-Huron* à *Sarnia*) sous la rivière *Saint-Clair*, longueur de la traversée : 2.465 p. ($751^{m}83$).

De 1890 à 1892, à *Liverpool* :

Souterrain sous la Mersey (destiné à amener à *Liverpool* les eaux du lac *Virnwy*).

De 1890 à 1892, en *Angleterre :*

Souterrain de Glascow, sous la *Clyde.*

De 1892 à 1896, à *Glascow :*

Le **Glascow district Subway** (chemin de fer Métropolitain de *Glascow*).

De 1892 à 1894, à *New-York :*

Souterrain sous la rivière de l'Est (East River Gas C°).

(De Long Island City à New-York.)

De 1892 à 1897, à *Londres* :

Souterrain de Blackwall à Woolwich (sous la Tamise).

De 1892 à 1894, à *Paris* :

Siphon de Clichy (M. Berlier).

(Aqueduc destiné à conduire les eaux d'égout de Paris aux Champs d'épandage d'Achères en passant sous la Seine à *Clichy*).

De 1895 à 1896, à *Paris :*

Siphon de la Concorde (M. Berlier).

(Réseau complémentaire d'égouts).

De 1894 à 1897, à *Londres :*

Waterloo and City Railway (sous la Tamise).

De 1895 et 1896 à 1897 :

Collecteur de Clichy intra muros et extra muros (Boucliers à section elliptique).

Il conviendrait, évidemment, d'ajouter, à cette énumération quelques autres ouvrages du même genre, mais nous croyons avoir montré suffisamment que, depuis l'invention de *Brunel*, le bouclier a reçu de nombreuses applications.

Nous allons donc maintenant pouvoir traiter le sujet que nous nous sommes proposé et dont nous avons exposé les grandes lignes au début. Il s'agit, nous le rappelons, de la

Traversée sous la Seine au pont de la Concorde

L'exécution de cet important travail avait été confiée par la Compagnie Nord-Sud à MM. *J. Berlier et Cie.*

L'expérience acquise par *M. Berlier* dans des travaux similaires était la meilleure garantie de succès.

Cet ingénieur n'avait-il pas, en effet, importé en France un procédé qui avait acquis à l'étranger d'excellentes références? Par deux fois déjà, en peu d'années, il en avait fait l'application en traversant sous la Seine à *Clichy* et à la *Concorde*, et ses entreprises avaient pleinement réussi. (Égouts de Paris. Direction de M. Bechmann, ingénieur en chef.)

Nombreux sont cependant encore aujourd'hui les adversaires de ce procédé, même parmi les gens éclairés et expérimentés en matière de travaux publics.

Néanmoins, les résultats satisfaisants obtenus à *Clichy* et à la *Concorde* rallièrent à l'avis de *M. Berlier* assez de partisans pour que « l'établissement et l'exploitation d'un chemin de fer souterrain destiné à relier le quartier de Montparnasse à la Butte Montmartre » fussent concédés à *MM. Berlier* et *Janicot*, à la date du 31 janvier 1904.

A la suite d'une convention, cette concession fut plus tard rétrocédée à la Compagnie Nord-Sud. C'est alors que *MM. Berlier* et *Desplats* devinrent adjudicataires du quatrième lot, qui comprenait la traversée sous la Seine au moyen de deux tubes métalliques. Quelque temps après, pendant l'exécution des travaux, *M. Lillaz*, entrepreneur, s'adjoignit à eux.

Travaux préliminaires. Exécution de la station Université (1). — La station en maçonnerie par laquelle commence le quatrième lot est d'un type semblable à celui ordinairement adopté pour les autres lignes métropolitaines. Sa longueur intérieure, entre pignons, est de 75 mètres, et sa largeur entre piédroits est de $13^{m}74$; elle est suivie de deux ouvrages de raccordement plus étroits, en courbe de 212 mètres de rayon, et de 25 mètres de développement d'axe.

L'ouvrage principal est implanté suivant l'axe du boulevard Saint-Germain, entre la cote ($22^{m}10$) fond de fouille et la cote ($29^{m}40$) extrados, l'axe de la chaussée étant à la cote ($33^{m}10$).

(1) Il a été décidé que la station que nous nommons *Université*, conformément à son appellation primitive, serait dite « *Chambre des Députés.* »

La chambre de raccordement descend jusqu'à la cote ($20^{m}145$) fond de fouille.

Si l'on considère que le niveau de l'étiage varie entre (27 mètres) et ($27^{m}20$) on voit que pendant la période de sécheresse, c'est-à-dire pendant la saison la plus favorable aux travaux souterrains, le niveau le plus bas de la nappe se trouve encore être à la hauteur de l'extrados de l'ouvrage de raccordement. Pendant les crues ce dernier est évidemment complètement noyé.

Des sondages avaient montré que, de la voûte au radier, on ne rencontrerait que des sables d'alluvions et une sorte de boue calcaire sans consistance.

Avant toute chose, disons que les entrepreneurs s'étaient imposé de réduire au minimum strictement indispensable l'espace à occuper sur la voie publique. Le quartier dans lequel ils avaient à opérer (boulevard Saint-Germain, Cercle Agricole, quai d'Orsay, Chambre des Députés) ne se prêtant guère à l'encombrement de la circulation par les véhicules de transport de matériaux — véhicules que l'on sait lourds, encombrants et peu décoratifs, il fallait, en quelque sorte, pouvoir travailler, sinon à l'insu du public, du moins sans l'incommoder. Dans ce but, il fut décidé qu'une galerie souterraine relierait le chantier à la Seine.

On commença donc par construire sur la Seine, en bordure du quai d'Orsay, un peu en amont du pont de la Concorde, une solide estacade en bois de 70 mètres de longueur contre laquelle les chalands pourraient venir accoster pour amener des approvisionnements ou recevoir des déblais.

Un pont roulant, mû électriquement, permettrait, en se déplaçant d'un bout à l'autre de cette estacade, de procéder au chargegement et au déchargement des bateaux.

Quant aux déblais, ils seraient déversés directement dans ces derniers, par simple basculage des wagons, sur le tablier de l'appontement.

Pendant que l'estacade se construisait, la galerie souterraine était attaquée. Elle devait assurer le service entre la Seine et le chantier du boulevard Saint-Germain par le moyen d'un puits de service avec monte-charge et d'un tracteur électrique remorquant les rames de wagons.

Cette galerie, qui passe presque à fleur de sol, a une longueur totale de 201 mètres et une section en plein cintre de 2 mètres sur 2 mètres. Commencée en mars 1906, sa construction fut interrompue par une grève générale des terrassiers, qui dura plus d'un mois, et à la suite de laquelle les exigences de ces derniers dépassèrent toutes prévisions.

La faible profondeur à laquelle est implanté cet ouvrage en rendit l'exécution particulièrement délicate, en raison du nombre et de la nature des obstacles rencontrés.

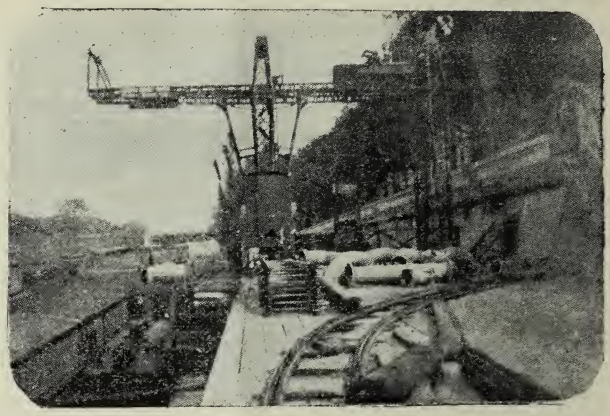


Fig. 8. — Débouché de la galerie de service sur l'estacade construite en bordure du quai d'Orsay

Le public ignore ce que Paris renferme, à quelques pieds sous la chaussée, d'égouts petits et grands et de canalisations de toutes sortes : eau, gaz, air comprimé, câbles électriques à haute tension, etc...

Il fallut couper, isoler, déplacer les uns ou les autres, avec les autorisations nécessaires et la galerie put enfin être mise en service dans le courant du mois de juin.

L'exécution de la station en maçonnerie a présenté des difficultés dont les professionnels, qui ont suivi de près ce travail, ont seuls pu se rendre compte.

Arrêter à l'avance un programme d'exécution dans ses détails

paraissait bien aléatoire. De toutes façons il fallait commencer par foncer un puits.

Ouvert le 6 avril 1906 à la cote (33^m10), ce puits n'a été rendu à fond, à la cote (21^m85), soit à une profondeur de 11^m25, que le 20 mai suivant. Il fut divisé en deux compartiments dont l'un, à la la base duquel se trouvait un puisard de grande capacité, était réservé aux épuisements, et l'autre au service du monte-charge.

A partir de la cote (27^m00) niveau de l'étiage, l'eau arriva en telle abondance qu'il fallut suspendre le travail et installer de puissantes pompes rotatives, qui évacuaient les eaux dans l'égout collecteur impair du boulevard Saint-Germain.

A cette cote se trouve, en effet, une épaisse couche de sables aquifères qui établissait une communication directe entre le puits et la Seine, à tel point que les variations de niveau de cette dernière étaient accusées quelques heures après dans la fouille.

Un essai d'attaque des piédroits en galerie montra qu'il était inutile de persister dans cette voie tant le travail était long et pénible, et le percement d'une galerie supérieure d'avancement dans l'axe de l'ouvrage fut décidé et reçut immédiatement un commencement d'exécution.

Un deuxième puits pour le service devenait nécessaire. Percé à peu près au milieu de la longueur de la station et légèrement désaxé, ce puits fut descendu jusqu'à la cote (27^m19), soit jusqu'au niveau du sol de la galerie, dans des conditions normales.

Cette solution permettait deux nouvelles attaques et, par suite, une augmentation sensible de la vitesse d'avancement.

En ce qui concerne les abatages, de grandes précautions s'imposaient. Le peu de consistance du terrain et, aussi, le voisinage immédiat de deux égouts en mauvais état n'étaient pas sans causer d'inquiétudes.

La galerie fut divisée en un certain nombre de parties égales de 3^m20 environ de longueur et les abatages effectués en ayant soin de laisser toujours au moins 3^m20 entre deux fouilles voisines.

Un fort boisage solidement armé, des enfilages de madriers en couronne, souvent doublés, permirent seuls de venir à bout de ce travail, sans accident, encore fallut-il toute la prudence d'un personnel mineur choisi pour le mener à bien.

Foncer les piédroits dans de pareilles conditions n'était pas chose facile, l'eau apparaissant, presque d'un bout à l'autre, au niveau du sol de la galerie.

Dans chaque fouille plusieurs pompes rotatives arrivaient avec peine à tenir l'eau. Le sable fin, malgré toutes les précautions, finissait par engorger les crépines, et l'eau, montant aussitôt, obligeait les ouvriers à se retirer. Heureux encore lorsqu'une interruption du courant électrique (Est-Parisien à ce moment) n'arrêtait pas, en même temps, sur tout le chantier, moteurs et lumières.

On dut, plus tard, en vue de l'attaque des tunnels, pour obvier à cet inconvénient, avoir recours à des sources d'électricité plus puissantes et plus sûres.

L'envahissement des fouilles par l'eau était toujours suivi des pires conséquences.

On comprend bien, en effet, que si jointifs que soient les coffrages ils laissent toujours passer un peu de sable.

Sous l'action des mouvements successifs, ascendant et descendant, de l'eau derrière ses coffrages, le terrain se désagrège et coule, entraîné jusque dans les aspirations des pompes. Des vides, des poches se forment, inévitables, invisibles, qui provoquent des tassements du toit suivis, dans un temps plus ou moins long, de tassements de surface.

En prévision de ces mouvements auxquels on s'attendait, les boisages étaient renforcés et contreventés de façon à rendre le glissement des pièces ou leur déformation impossible.

Ce n'était pas tout, le sous-sol, en maints endroits, n'avait pas la résistance voulue. Force fut, à ces endroits, de battre des pieux pour éviter d'avoir à descendre les piédroits jusqu'au solide.

La situation se compliquait, comme nous l'avons déjà dit, du mauvais état des égouts qui bordaient le boulevard Saint-Germain à droite et à gauche.

Disloqués, fendus en tous sens de la voûte au radier, ces égouts ne pouvaient plus recevoir une goutte d'eau sans la laisser passer. Cette eau, sans cesse renouvelée, pénétrait dans les terres environnantes et arrivait jusqu'aux abatages. L'égout suivait le mouvement et se fissurait encore un peu plus. Il fallut aviser. Le Ser-

vice municipal dûment informé prit les mesures d'usage. Des barrages furent faits et des buses posées, qui récoltaient les eaux des branchements particuliers et les conduisaient jusqu'en aval de l'ouvrage.

Chaque égout contenait des conduites d'eau, dont une d'alimentation en eau de Vanne, en particulier, était logée dans celui de gauche.

Elle avait un mètre de diamètre et la pression intérieure à laquelle elle était soumise, en pleine charge, était de 4 k. 500 par centimètre carré. Cette conduite était, pour le chantier en cours de terrassement, un danger permanent. Fléchissant tous les jours un peu plus sous la poussée des reins de la voûte, qui la chassaient, elle menaçait de se rompre. Le Service municipal des Eaux tenu au courant de la situation dès les premiers jours, et ne pouvant priver d'eau le huitième arrondissement en pleine période estivale (juillet), prit le parti de la maintenir en service et de la suspendre, au moyen de fortes chaines placées tous les deux mètres, à des longrines disposées dans le sens transversal et reposant sur le trottoir. L'égout fut, de plus, solidement boisé à l'intérieur pour éviter l'affaissement de la voûte et le rapprochement des piédroits.

De l'autre côté du boulevard Saint-Germain, la situation n'était pas meilleure. Une conduite d'air comprimé de $0^{m}50$ de diamètre, soumise à une pression intérieure de 5 kil. pouvait, sous l'effet des tassements, causer en se rompant, un accident dont il était difficile de prévoir les conséquences.

La Compagnie intéressée procéda aussitôt à l'isolement du tronçon en danger. Celui-ci fut tamponné à chaque extrémité et vidé au plus vite.

Les fouilles de piédroits étaient, au fur et à mesure de leur achèvement, remplies de béton au dosage de 450 kil. de ciment de Portland, et l'anneau de voûte correspondant était aussitôt construit, avec mortier de ciment au même dosage.

Le tassement prévu, quoique très fort cependant, fut quelquefois dépassé.

L'exécution des murs pignons amont et aval vint ensuite et fut entourée des mêmes précautions.

L'enlèvement des stross et la construction du radier se firent sans grande difficulté. Les eaux recueillies par des drains étaient dirigées vers les puisards amont et aval.

Nous pensons nous être suffisamment étendu sur la construction d'un simple ouvrage en maçonnerie qui, sans la nature du terrain, le voisinage immédiat de la Seine et celui de riches immeubles qu'il fallait à tout prix laisser intacts, n'aurait présenté aucun intérêt particulier.

Dans le mur pignon servant d'origine aux deux tubes métalliques deux ouvertures circulaires, d'un diamètre un peu supérieur à celui des boucliers, avaient été ménagées de façon à permettre l'introduction de ceux-ci comme première opération du départ.

Aménagement de la station en usine à air comprimé. — Aussitôt construite, la gare fut aménagée en véritable usine (1) et les boucliers arrivés d'Angleterre (Chesterfield), par morceaux, furent montés en regard de leurs emplacements respectifs. Ce travail dura plusieurs mois.

La machinerie avait été étudiée de très près, et les prévisions relatives à la consommation d'air comprimé, surtout, envisagées largement. C'est probablement grâce à cette excellente précaution qu'il fut possible dans la suite, de sortir assez rapidement et sans trop de dommage de certaines situations qui, de prime abord, ne s'annonçaient pas comme très favorables.

La construction de la station et des chambres de raccordement avait montré qu'il n'était pas prudent d'aller plus loin sans air comprimé. Il fallait donc, avant toute chose, installer des compresseurs et, aussitôt que possible, des écluses à air à l'entrée de chaque tunnel. Le terrain, à l'origine des tunnels surtout, essentiellement composé de sable à la partie supérieure sur une longueur de plus de 100 mètres, faisait pressentir des pertes d'air

(1) Nous avons dit plus haut que les entrepreneurs s'étaient proposé d'encombrer le moins possible la voie publique. L'installation d'une usine d'air comprimé exigeant beaucoup de place, il était tout indiqué d'utiliser la station à cet usage. Cette solution présentait aussi le grand avantage de ne pas laisser le bruit se répercuter au dehors.

considérables, d'où la nécessité d'employer des machines à grand débit. Quant à la pression, elle ne devait pas dépasser 1 kil. 800.

Quatre compresseurs *Ingersoll* à deux cylindres basse pression et, pour les commander, quatre dynamos *Thomson-Houston* de 250 H P furent donc mis en place sur de forts massifs en béton. Ces machines pouvaient produire ensemble un débit total moyen de 20.000 mètres cubes à l'heure mesurés à la pression de 1 kil.

Fig. 9. — Descente d'un cylindre de compresseur dans la station « Université » aménagée en usine

La distance d'axe en axe entre le moteur et le compresseur avait été fixée à 10 mètres. La commande se faisait par courroie.

Le courant était reçu en alternatif triphasé à 5.500 volts de deux usines différentes : *Le Triphasé* d'Asnières et l'usine des *Moulineaux*. Mais les moteurs ne l'utilisaient qu'à 220 volts. A cet effet, deux transformateurs statiques avaient été prévus. Un petit compresseur à deux cylindres haute pression, compoundés,

pouvait fournir, dans un réservoir formant volant, de l'air comprimé jusqu'à 10 kil. pour alimenter des machines-outils telles que riveuses, perforatrices et malaxeurs.

Ce petit compresseur était actionné par une dynamo spéciale et la commande se faisait également par courroie. Il pouvait nécessiter un effort maximum de 60 HP.

Disons, une fois pour toutes, que chaque machine avait son moteur.

Deux pompes *Decauville* à trois cylindres fournissaient l'eau sous pression nécessaire à l'alimentation des vérins hydrauliques montés sur chaque bouclier et destinés à produire son avancement.

Par le moyen de by-pass et de jeux de vannes appropriés, l'eau provenant des pompes était dirigée à volonté soit sur les boucliers soit sur les élévateurs (1), soit encore sur un bouclier d'une part et sur un élévateur de l'autre.

Les tuyauteries d'alimentation, avant de parvenir aux boucliers et aux élévateurs, traversaient des régulateurs de pression dont le but était de limiter cette dernière à 160 kil. par centimètre carré pour les vérins des boucliers, et à 60 kil. pour les élévateurs.

Les pompes pouvaient, en effet, fournir de l'eau jusqu'à 400 kil. par centimètre carré, et cette pression, beaucoup trop forte dans la plupart des cas, devait pouvoir être réglée pour éviter de fatiguer inutilement ces pompes et les machines alimentées par elles. Nous devons dire, pour la compréhension de ces détails, que l'effort maximum exigé par l'élévateur est connu d'avance, puisqu'il sert uniquement à mettre en place mécaniquement un poids connu dont les limites du déplacement sont connues, tandis que l'effort exigé pour l'avancement du bouclier dépend sur-

(1) L'élévateur est un dispositif monté sur le bouclier. Ce dispositif est destiné à permettre la mise en place des différents segments ou voussoirs, qui constituent un anneau. Il est mû hydrauliquement et disposé de telle façon que l'on peut, en combinant au moyen de commandes appropriées, le mouvement de rotation au mouvement de translation, faire occuper à son extrémité qui porte accroché un segment, tous les points de la circonférence ou du cercle à volonté.

tout de la résistance que celui-ci rencontre dans le terrain, et du nombre de vérins en prise nécessaires pour réaliser cet avancement.

Plusieurs groupes électriques spéciaux pouvaient fournir en continu 110 volts : l'éclairage de la gare et des tunnels, le courant pour les locomotives électriques, les monte-charges et des pompes réparties dans le chantier. Il suffisait pour cela d'utiliser en moteurs des dynamos à courant alternatif qui commandaient soit par courroie soit par accouplement direct, des génératrices en continu 110 volts.

Les lampes employées étaient de deux types : à incandescence et à mercure. Ces dernières, système *Cooper Heywitt*, quoique produisant un éclairage intense et très avantageux comme consommation ont cependant le grand inconvénient d'émettre une lumière verdâtre qui dénature complètement la couleur des objets éclairés. En dehors de cette particularité, qui n'a guère d'importance dans un chantier de travaux publics, elles donnent toute satisfaction.

Un puissant ventilateur électrique, installé à la base d'un puits rond de $1^{m}20$ de diamètre en communication avec l'extérieur et percé spécialement pour cet usage, permettait le renouvellement constant de l'air et rendait la température très acceptable.

Deux tableaux de distribution à haute tension, dont un de secours, recevaient directement le courant à 5.500 volts des deux usines génératrices. D'autres tableaux de distribution pour la commande des groupes moteurs étaient installés à proximité de ces machines.

Une énorme tuyauterie en tôle, abouchée à la base d'une cheminée qui s'élevait à 6 mètres au-dessus de la chaussée, amenait l'air de l'extérieur dans un collecteur de distribution qui alimentait les quatre grands compresseurs dont les lumières d'aspiration étaient réglées par des soupapes de calage.

L'air comprimé sortant des cylindres après un premier refroidissement dans les doubles enveloppes de ces derniers, refroidissement obtenu par circulation d'eau venant directement de la Seine où deux pompes étaient installées se rendait, par l'intermédiaire d'un collecteur de refoulement, dans deux réfrigérants multitubulaires à grande surface, d'où il sortait par deux tuyau-

teries de 0^m400 de diamètre indépendantes l'une de l'autre. Ces deux tuyauteries isolées amenaient l'air entre 20 et 22 degrés jusqu'à l'entrée de chaque tunnel, et là, se subdivisant en deux autres, pénétraient dans les chambres à air comprimé.

Afin d'éviter de graves accidents en cas de rupture des conduites d'amenée, un clapet de retenue étudié spécialement terminait chacune d'elles à son débouché dans la chambre.

Des soupapes de sûreté étaient placées aux endroits convenables ; tout un réseau de tuyauteries de secours et des jeux de vannes permettaient d'isoler, pour les besoins du service ou pour des réparations, un compresseur quelconque, les autres étant en marche.

Nous dirons, pour terminer cet exposé rapide, que la puissance totale de cette usine était d'environ 1.200 chevaux.

Les travaux d'aménagement de la station et le montage des boucliers avait duré jusqu'en août 1907. Ce n'est que vers le 15 de ce mois que tout fut réellement prêt à partir.

Bouclier et revêtement métallique. — Nous pensons le moment venu de présenter brièvement le type de bouclier que nous avons employé, ainsi que le revêtement métallique des tunnels (1). Au fur et à mesure de l'avancement du travail, nous dirons ce que nous pensons de l'un et de l'autre.

Le bouclier construit par les soins de *MM. Marckam et Cie*, de *Chesterfield* (Angleterre) était circulaire. C'était un grand cylindre en tôle d'acier de 4^m60 de longueur et de 5^m34 de diamètre intérieur, c'est-à-dire de 0^m10 supérieur à celui du diamètre extérieur

(1) Le revêtement métallique est constitué par une succession d'anneaux de fonte que l'on boulonne les uns à la suite des autres. Chaque anneau pèse environ trois tonnes. Il est formé de pièces séparées appelées segments ou voussoirs également boulonnés entre eux. Chacun de ces voussoirs porte des brides pour permettre le boulonnage et la formation des joints (*fig.* 11); il est de plus renforcé par des nervures. Dans les joints plats on intercale des plaquettes de bois tendre pour donner de l'élasticité et une étanchéité provisoire, et dans les gorges laissées par les joints, on lisse du ciment ou l'on comprime du mastic métallique. Chaque anneau se compose de 12 segments dont 10 grands, 1/2 segment appelé contreclé et enfin un très petit segment à brides parallèles qui forme clé et que l'on place toujours à la partie supérieure et dans l'axe du tunnel.

du tunnel. Ce cylindre était formé de deux tôles marines de 14 millimètres d'épaisseur superposées et rivées sans aspérités. Il était renforcé à sa partie antérieure, celle qui devait pénétrer dans le terrain, par une armature épaisse, en acier coulé, forte-

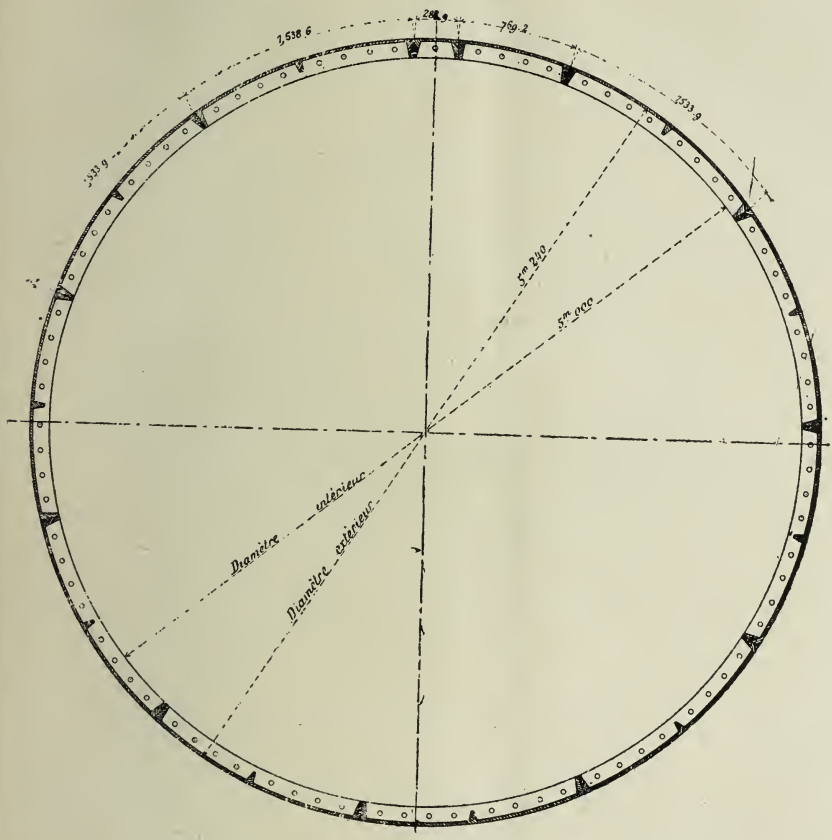


Fig. 10. — Coupe transversale d'un anneau constitué montrant les 12 segments assemblés

ment nervée et terminée en biseau. Cette armature régnait sur les trois quarts environ de la circonférence et constituait ce que l'on appelle le couteau ou la trousse coupante (1).

(1) Dans les terrains mous, comme l'argile de Londres par exemple, le bouclier fait lui-même sa place par pression et joue le rôle d'emporte-pièce,

A l'arrière, le bouclier se terminait par une queue ou tôle de recouvrement à l'abri de laquelle se montait le dernier anneau. Cette tôle arrière pouvait recouvrir le tunnel, ou mieux, l'emboîter sur la longueur d'un anneau et demi, soit sur $0^m60 + 0^m30 = 0^m90$.

Dans le sens transversal, le bouclier était divisé en quatre compartiments par le moyen de deux entretoises dont une verticale formant cloison médiane et une horizontale servant de plancher.

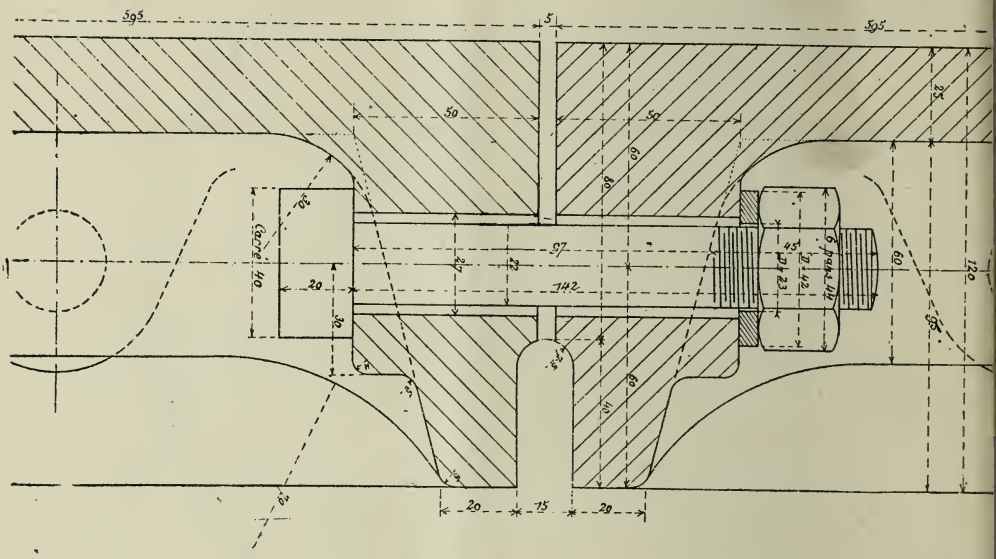


Fig. 11. — Détail d'un joint

Chacun de ces compartiments était divisé dans la longueur en trois chambres par des tôles formant chicanes. C'est dans les

le terrain découpé tombant de lui-même. Mais il n'en est pas de même dans la roche ou dans des terrains qui, sans être durs, opposent cependant une grande résistance au couteau. On est obligé, dans ce dernier cas, de préparer intégralement la place nécessaire au bouclier pour lui permettre d'avancer de la longueur d'un anneau, c'est-à-dire de 0^m60 en ce qui nous concerne. Dans ceux qui manquent de consistance ou d'homogénéité le travail est bien plus délicat encore, il faut boiser le toit, le front d'attaque et les flancs.

quatre chambres en contact avec le terrain que se tiennent les mineurs préposés à l'avancement.

Cette disposition avait pour but de limiter au bouclier les écoulements possibles de vase ou de terrain fluent, et de toutes façons, en cas d'envahissement général du tunnel par des boues ou de l'eau, de maintenir à la partie supérieure de celui-ci une chambre d'air comprimé. Cette dernière précaution avait surtout en vue d'assurer la sécurité du personnel. Dès l'annonce d'un accident de ce genre, des tôles mobiles toutes prêtes à être boulonnées en place devaient pouvoir fermer complètement le bouclier. Nous croyons que les hommes d'expérience n'ont jamais accordé à cette planche de salut qu'une confiance relative. Il faut avoir vu une panique pour se rendre compte que le sang-froid n'est pas la qualité prédominante chez la plupart des gens qui se croient menacés.

La carcasse du bouclier étant ainsi constituée, disons un mot des organes qui lui communiquaient le mouvement.

Vingt-quatre vérins ou presses hydrauliques répartis uniformément sur le pourtour, à l'intérieur du cylindre bien entendu, et fixés à celui-ci par de très forts bâtis en acier, permettaient, en prenant appui sur la tranche ou bride du dernier anneau posé, de pousser le bouclier en avant.

L'eau sous pression venant des pompes de l'usine était distribuée dans les vérins en action par les soins d'un mécanicien qui, en ouvrant ou en forment des jeux de robinets spéciaux, faisait sortir les pistons de ces vérins ou limitait leur mouvement.

A l'aide du jeu d'autres robinets et d'une vanne de changement de marche, on ramenait les tiges de pistons à leur position initiale. Chaque robinet commandait deux vérins.

Si l'on admet que l'effort développé par un de ces appareils pouvait atteindre 100 t., on obtient pour la valeur de la poussée totale exercée sur le bouclier :

$$100 \times 24 = 2.400 \text{ t.}$$

Le bouclier et tous ses accessoires pesant environ 90 tonnes aurait dû pouvoir glisser, dans tous les cas, sans aucune difficulté. Mais d'autres causes, malgré la force formidable dont on disposait, rendaient quelquefois l'avancement très pénible.

Nous devons citer en particulier le mauvais état du terrain qui, souvent, à l'origine surtout et dans les sables principalement, ne permettait pas de préparer en grand tout le terrassement nécessaire pour laisser libre l'avancement du bouclier. Il fallait boiser jointivement le toit, les flancs et le front d'attaque, pour éviter des éboulements dont les conséquences auraient certainement été désastreuses, étant donné le voisinage immédiat d'importants immeubles dont on longeait les fondations. Le bouclier devait donc, pour ainsi dire, refouler tout ce boisage en avançant, ce qui exigeait un sérieux effort. De plus, pour des considérations dépendant uniquement de la direction, il ne fallait pas employer à la fois tous les vérins mais simplement quelques-uns d'entre eux, et souvent ceux qui, à ce moment, avaient besoin de réparations urgentes.

La vitesse d'avancement étant, comme on le sait, un facteur des plus importants dans l'exécution d'un travail, il fallait marcher quand même. Alors la pression de l'eau dans les organes en service atteignait parfois, dans ces conditions, des limites exagérées.

Élévateur. — Montage des anneaux. — Le bouclier décrit en tant que carapace mobile à l'abri de laquelle les ouvriers mineurs pouvaient se livrer, à peu près en sécurité, au travail de terrassement, il reste à dire un mot d'un dispositif spécial dont la fonction est de permettre le montage des anneaux par voussoirs ou segments séparés : c'est l'élévateur.

Nous avons fait plus haut, en parlant des pompes Decauville, une description sommaire de cet appareil.

Fixé au centre du bouclier, dans le plan vertical ou très peu incliné du dernier anneau à poser, c'est-à-dire à l'abri de la queue du bouclier, l'élévateur, mû hydrauliquement, est mobile autour d'un axe perpendiculaire à ce plan.

Cet axe, formant pignon denté, engrène avec une crémaillère montée sur la tige d'un piston terminé en vérin à ses deux extrémités. Il porte en outre un bâti formant glissières auquel le mouvement est communiqué : voilà pour la rotation.

Une tige en acier profilé à double T faisant coulisseau dans les glissières du bâti peut, actionnée par un vérin spécial, s'allonger

ou se raccourcir à volonté, de telle sorte que, en combinant le mouvement de rotation à celui de translation, on peut faire occuper à son extrémité tous les points que l'on veut dans le plan du dernier anneau.

Cette extrémité est disposée spécialement pour permettre d'y accrocher le segment que l'on se propose de mettre en place.

Voici donc comment on s'y prend pour monter un anneau :

Quand l'avancement du bouclier, au moyen des vérins prenant appui sur la tranche ou bride du dernier anneau du tunnel, est suffisant pour permettre d'ajouter un anneau à ce dernier, on transporte à pied-d'œuvre le segment inférieur que l'on met en place à bras. Les autres segments sont ensuite successivement amenés, accrochés à l'élévateur et disposés par celui-ci, alternativement à droite et à gauche, jusqu'à ce qu'il ne reste plus à placer que la clé. Cette dernière est introduite de bas en haut, grâce à la disposition de ses brides qui sont parallèles au lieu d'être, comme dans les autres segments, inclinées dans le sens du rayon.

Anneaux droits et anneaux courbes. Raccordements paraboliques. — La constitution du tunnel comporte des anneaux droits et des anneaux courbes.

Les anneaux droits sont des cylindres dont tous les grands segments sont identiques. On peut donc, indistinctement, prendre les uns pour les autres sans aucun inconvénient. Il n'en est pas de même des anneaux du type courbe qui sont non des cylindres, mais des tores. Dans ces derniers, dont les segments ne sont pas interchangeables, évidemment, il faut observer rigoureusement l'ordre de pose indiqué par les numéros et les repères, sous peine de s'exposer à de graves mécomptes.

Puisque nous venons de parler des différents types d'anneaux, disons, en passant, deux mots des raisons qui ont motivé leur emploi.

Il est bien évident que si la direction à suivre était rectiligne, il suffirait du type droit — mais il est assez rare qu'un tracé ne comporte pas de courbe. Celui que nous avons eu à observer en comportait quatre par tunnel, dont trois pour chaque partie tubée. De plus, ces courbes étaient de faible rayon : 120 mètres.

Le problème pouvait donc se résoudre ainsi d'une façon toute rationnelle : Employer le cylindre dans les alignements et le tore dans les parties courbes.

Que dans la pose des voies, pour des considérations de vitesse, d'usure, de fatigue du matériel on s'impose les raccordements paraboliques, rien de plus logique, quoique ce ne soit pas absolument indispensable, surtout dans les endroits où la vitesse des trains doit être très réduite, comme c'est précisément le cas, mais dans la construction même du tunnel, d'un tunnel à grande section, c'est beaucoup exiger.

En effet, dans nos plus grandes courbes la différence des rayons (procédé à centre conservé) n'étant que de $0^{m}22$ et le tunnel ayant 5 mètres de diamètre intérieur utile pour loger un véhicule dont l'encombrement total est de $2^{m}40$, il ressort clairement que l'on avait pour opérer sur les voies seules, en les ripant sur le ballast, toute la latitude voulue.

Malgré cela, puisque les raccordements paraboliques étaient imposés dans la construction du tunnel, il restait donc à trouver le moyen d'en tenir compte le plus économiquement possible.

Suivre, même rigoureusement, la courbure parabolique, c'était très simple en faisant fondre toutes les séries d'anneaux nécessaires, mais c'eût été horriblement cher, surtout en France, où la fonte et le travail des modeleurs ne sont pas précisément bon marché. De plus, il eût fallu des modèles spéciaux pour chacune des six courbes, puisque ces courbes ont des développements différents.

On prit le parti, pour simplifier, de combiner les anneaux droits aux anneaux courbes et la question fut résolue, par ce moyen, de façon satisfaisante.

Nous parlerons plus loin des procédés qui ont été employés pour assurer la direction dans les tunnels, ainsi que des vérifications diverses et des appareils utilisés à cet usage.

Ces procédés ont d'ailleurs pleinement justifié leur emploi.

Exécution des tunnels métalliques. Départ du bouclier n° 1. — C'est le 15 août 1907 exactement que le bouclier du tunnel de droite, dit n° 1, prenant appui sur une énorme charpente en bois, spécialement construite pour cet usage, fut poussé en

avant pour la première fois et amené en contact avec le masque ou blindage en planches qui fermait l'orifice circulaire ménagé dans le mur pignon.

Le travail des mineurs commencé, le masque fut démoli, et le bouclier pénétra sous l'effort des vérins dans l'ouverture qui lui était réservée.

Quelques jours après il n'avait pas fait grand chemin. Engagé à fond dans une maçonnerie très rugueuse et épaisse de 2 mètres, il s'était coincé, et les efforts faits pour le dégager n'avaient pas donné de résultats satisfaisants. Tout retour en arrière était sinon impossible du moins aussi difficile que la marche en avant. L'ouverture fut retouchée et malgré cette précaution l'effort qu'il fallut faire pour vaincre la résistance et passer outre fut évalué à 980 tonnes. La charpente appui, qui cependant n'avait pas été prévue pour une telle poussée, résista néanmoins.

Une galerie d'avancement solidement boisée avait été préalablement percée à l'entrée de chaque tunnel, au niveau de la cote de départ ($21^{m}28$). Elle précédait le bouclier d'une dizaine de mètres environ et avait surtout pour but de guider ses premiers pas et de lui préparer un chemin de glissement exactement réglé à la pente et dans la direction voulues. C'est, d'ailleurs, un procédé auquel nous avons dû avoir recours dans la suite d'une facon continue..

Jusqu'à l'extrémité de cette galerie, l'avancement se fit lentement, il est vrai, mais sans difficulté. C'était un début, et le personnel ouvrier, composé essentiellement de mineurs et de terrassiers, avait besoin de se familiariser avec ce genre de travail absolument nouveau pour lui. Le montage des anneaux surtout, qui nécessitait beaucoup de soins et de méthode, était la principale cause de retard.

En Angleterre, en Amérique, où ce procédé est, comme nous l'avons vu précédemment, employé couramment depuis longtemps, cette tâche est confiée à des spécialistes qui en ont fait un véritable métier. Aussi, de pareils ouvriers arrivent-ils à un résultat surprenant de précision et de rapidité. Il ne nous était guère possible, malheureusement, pour des raisons que l'on devine, d'avoir recours à des étrangers, c'eût été courir au devant de représailles certaines de la part des nôtres.

Cependant, au fur et à mesure de l'avancement le montage des anneaux devenait plus laborieux. Ils s'aplatissaient — ils coinçaient dans la queue du bouclier — on ne les boulonnait plus qu'avec la plus grande difficulté. Et pourtant le bouclier était bien à sa place en hauteur et en direction.

En ce qui concerne la déformation des anneaux, le remède était facile à trouver. Ils s'écrasaient sous leur poids, pour les arrondir on se servit de tendeurs horizontaux à l'aide desquels on ramenait le diamètre à sa longueur théorique ; une injection de ciment liquide sous pression autour des anneaux posés, une fois la prise faite, maintenait les flancs et remplaçait les tendeurs qui devenaient ainsi disponibles.

Mais pourquoi, ainsi arrondis, les anneaux continuaient-ils à coïncer de plus en plus dans le bouclier à tel point que leur montage allait devenir impossible?

Puisque le bouclier était bien à sa place et que les anneaux devaient suivre, forcément, par construction, il n'y avait aucune cause apparente pour gêner le montage. Et bien si, il y en avait et les voici.

Premièrement, les anneaux, quoique présentés sur le marbre, paraît-il, chez le fondeur, ne sont pas rigoureusement dressés, loin de là. De plus, nous avons dit qu'entre les bords de deux anneaux consécutifs on intercale des joints de bois tendre. Il est bien évident que sous la poussée du bouclier, qui agit presque toujours inégalement sur les différents segments pressés, les joints s'écrasent plus ou moins et finissent par donner à l'anneau que l'on monte une orientation défectueuse. Ces écarts de direction s'ajoutant quelquefois au défaut de dressage des deux faces d'un anneau amènent, beaucoup plus rapidement qu'on ne serait tenté de le croire, une déviation sérieuse de l'axe du tunnel.

Si l'on considère qu'il y a très peu de jeu entre l'extérieur d'un anneau et l'intérieur du bouclier dans la partie qui emboîte cet anneau, et que, de plus, ce dernier peut encore être sensiblement aplati, on comprendra que la moindre déviation peut avoir pour effet de produire le coïnçage.

Le remède apparaît dès lors clairement. Contrairement à ce que l'on croit généralement, ce n'est pas le bouclier qui doit suivre rigoureusement le tracé, c'est le tunnel. Le bouclier doit

pouvoir être manœuvré librement et il ne faut pas lui demander autre chose que de permettre la pose du dernier anneau sans gêner celui-ci dans aucun sens, soit en hauteur, soit en direction.

Il nous a donc fallu, soit dit en passant, au moment où cette vérité est devenue pour nous un axiome, remanier complètement la méthode que nous avions commencé à suivre et abandonner l'emploi d'appareils spéciaux que nous avions fait construire pour en revenir simplement au théodolite et au clinomètre (1).

Départ du bouclier n° 2. — C'est en août 1907 que le bouclier du tunnel de gauche, dit n° 2, fut mis en marche.

Contrairement à ce qui avait été fait pour le premier, on ne se servit pas, comme appui, d'une charpente en bois. Cette dernière, trop élastique quoique très résistante cependant, se comprimait sous l'effort des vérins et réagissait aussitôt que ceux-ci n'exerçaient plus leur pression, de sorte que les anneaux montés à la suite du bouclier subissant cette réaction, finissaient par prendre une position défectueuse.

Pour ne pas retomber dans le même inconvénient, il importait de trouver un appui moins souple. La question fut très facilement résolue par le procédé suivant.

En premier lieu, la pénétration circulaire ménagée dans le pignon, et dans laquelle devait s'engager le bouclier, fut agrandie dans tous les sens et suffisamment pour que ce dernier pût la franchir sans entrer en contact avec ses parois ; c'était naturellement le meilleur moyen pour réduire les frottements au minimum. En outre, l'appui fut constitué par un anneau de fonte complet et un certain nombre d'anneaux incomplets ou de fractions d'an-

(1) Le *clinomètre* est un appareil qui sert à mesurer la pente ou l'inclinaison. Ceux que nous avions fait construire permettaient la lecture, au moyen d'une aiguille se déplaçant sur un cadran à graduations amplifiées, des pentes et des rampes, en millimètres, de 0 à 50. Le *clinomètre* s'adaptait sur le bouclier au moment de son avancement. Il était fixé par des boulons mobiles et toujours au même endroit (protégé bien entendu), sur une partie rigide et bien contreventée. Avant le départ du bouclier, l'inclinaison de cette partie rigide avait été mesurée très exactement..

neaux, plutôt, dans lesquels on ne montait que la partie inférieure.

Le nombre de segments employés allait ainsi en diminuant de la queue du bouclier, qui renfermait l'anneau entier, à la surface d'appui présentée par un redan de maçonnerie du radier, en contact seulement avec quelques segments.

Par ce moyen, l'opération réussit à merveille et l'on n'eût pas à constater, comme la première fois, de mouvement rétroactif des anneaux après les premiers avancements du bouclier.

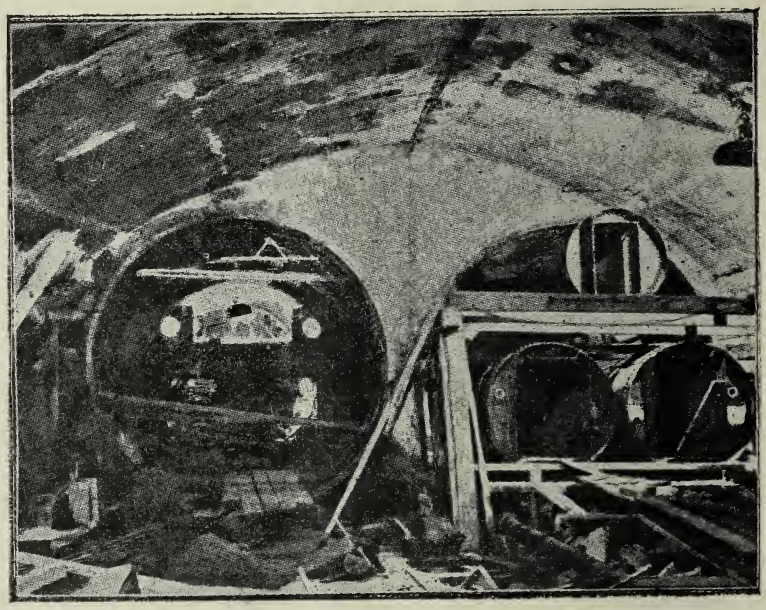


Fig. 12. — Montage des sas à air du tunnel n° 1

Montage des sas ou écluses à air comprimé. — Nous avons dit, précédemment, que la présence des sables aquifères et la grande quantité d'eau rencontrée rendraient nécessaire l'emploi de l'air comprimé dès l'origine des tunnels métalliques. Le moment était venu de mettre en place les écluses.

Les sas ou écluses à air comprimé sont, comme chacun sait, des chambres de transition qui permettent de passer de l'air libre dans un espace soumis à l'air comprimé, ou inversement.

Ils peuvent être placés verticalement sur des cheminées ou fixés horizontalement dans un diaphragme, suivant qu'on les utilise en fonçage vertical (procédé par caissons) ou en cheminement horizontal (procédé par bouclier avec revêtement métallique).

Dans le cas qui nous occupe, les sas (1) étaient disposés horizontalement, au nombre de trois (deux inférieurs pour les matériaux et un supérieur pour le personnel), sur une cloison circulaire en forte tôle d'acier, fermant le tunnel à quelques mètres de son origine. Cette cloison, solidement armée, était fixée aux parois de fonte des anneaux par de nombreuses attaches en forme de goussets,

Le petit calcul suivant donnera une idée de la résistance que le diaphragme devait pouvoir opposer à la pression intérieure.

Le tunnel a $5^{m}19$ de diamètre intérieur.

La pression pouvait atteindre accidentellement 3 kil. par centimètre carré.

L'effort total sur la cloison pouvait donc être, le cas échéant, de :

$$\frac{\pi \times \overline{5{,}19}^{2}}{4} \times 3 \times 10^{4} = 634.680 \text{ kil.}$$

On voit par ce chiffre qu'il n'était pas superflu de consolider sérieusement les tôles du diaphragme, d'autant plus que ce dispositif, outre le mouvement vibratoire qui l'anime constam-

(1) Les sas étaient des cylindres en tôle d'acier, de $1^{m}50$ de diamètre intérieur et de $5^{m}10$ de longueur. Ils portaient à chaque extrémité une porte spéciale légèrement bombée dans le sens de l'effort à supporter. Ces portes s'appliquaient sur un siège garni de caoutchouc pour rendre la fermeture étanche — elles jouaient le rôle de soupapes à clapets et ne fonctionnaient que sous la pression de l'air, sans le secours de loquets ni de verrous d'aucune sorte.

A chaque extrémité également se trouvaient des robinets de manœuvre destinés à l'éclusage.

Dans l'unique but d'éviter aux ouvriers des accidents connus sous le nom de *coups de pression*, nous avions étudié un appareil de régulation permettant l'éclusage automatique, dans les limites de temps et de pression fixées par la Commission du Travail. (Voir *Ingénieur-Constructeur* n° 22.)

ment, est soumis quelquefois à de brusques changements de pression qu'il n'est pas facile d'éviter dans certains cas.

Le montage des sas dura environ un mois pendant lequel l'avancement fut continué à l'air libre, mais bien lentement, dans les deux tunnels.

L'eau, traversant les sables, en entraînait de grandes quantités, laissant inévitablement au-dessus du bouclier des vides qui provoquaient ensuite des tassements de surface.

Le voisinage immédiat d'importants immeubles n'était pas sans nous préoccuper. Déjà, pendant la construction de la station, quelques légères fissures avaient été remarquées sur plusieurs d'entre eux, mais elles furent reconnues anciennes pour la plupart. Il faut déclarer à cette occasion que presque toutes les maisons du boulevard Saint-Germain, colossales en apparence, ont des fondations insuffisantes comme dimensions et qui, bien plus, ne reposent pas sur un terrain capable d'en supporter le poids, souvent très considérable. Ces fondations ont été établies sur la première couche de sable rencontrée, c'est ce qui explique pourquoi les immeubles se sont fissurés aussitôt construits.

De toutes façons, il nous fallait prendre de grandes précautions : le front d'attaque fut boisé jointivement ainsi que les flancs et des enfilages de planches furent passés en couronnes.

Tout le boisage d'avant était maintenu au moyen de crics que l'on desserrait au fur et à mesure de l'avancement du bouclier

L'eau arrivait en telle abondance que des pompes rotatives furent installées pour permettre aux ouvriers de travailler plus commodément, d'autant plus que le tunnel descendait à une pente de $0^{m}04$ par mètre, cette eau en s'amassant au pied du bouclier les gênait considérablement.

VAN BONN,
Ingénieur, Directeur des Travaux.

(*A suivre.*)

CHRONIQUE

Aménagement d'un bassin à pétrole dans le port de Marseille

Les opérations d'embarquement et de débarquement des pétroles et autres marchandises inflammables ont besoin d'être protégées contre les imprudences ou les tentatives criminelles, soit du côté de terre, soit du côté de l'eau. Il faut aussi prendre les mesures nécessaires pour éviter, autant que possible, la propagation d'un incendie qui se déclarerait dans les dépôts effectués sur le terre-plein des quais ou à bord même des navires chargés de marchandises de cette nature. (La figure 1 indique la disposition du bassin à pétrole).

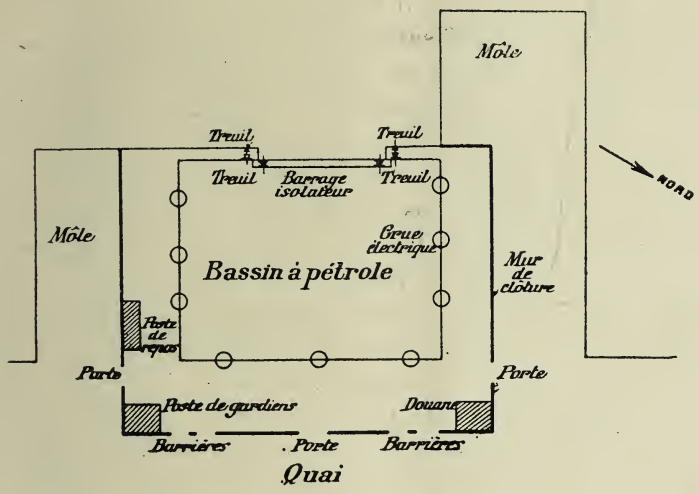


Fig. 1. — Plan du Bassin à pétrole

Le moyen le plus efficace de satisfaire, du côté de terre, à ces conditions, consiste dans l'isolement des quais entourant le bassin affecté aux opérations dont il s'agit par une barrière pleine continue et infranchissable. Cette barrière est comprise dans le projet définitif du bassin de la Pinède ; elle sera formée par un mur en maçonnerie avec portails en fer, de distance en distance, pour le passage des charrois et des voies ferrées. Toutes les issues en seront surveillées par des gardiens spéciaux de manière à interdire l'accès de l'enceinte au public lors de la présence de marchandises inflammables dans le bassin ou sur les quais.

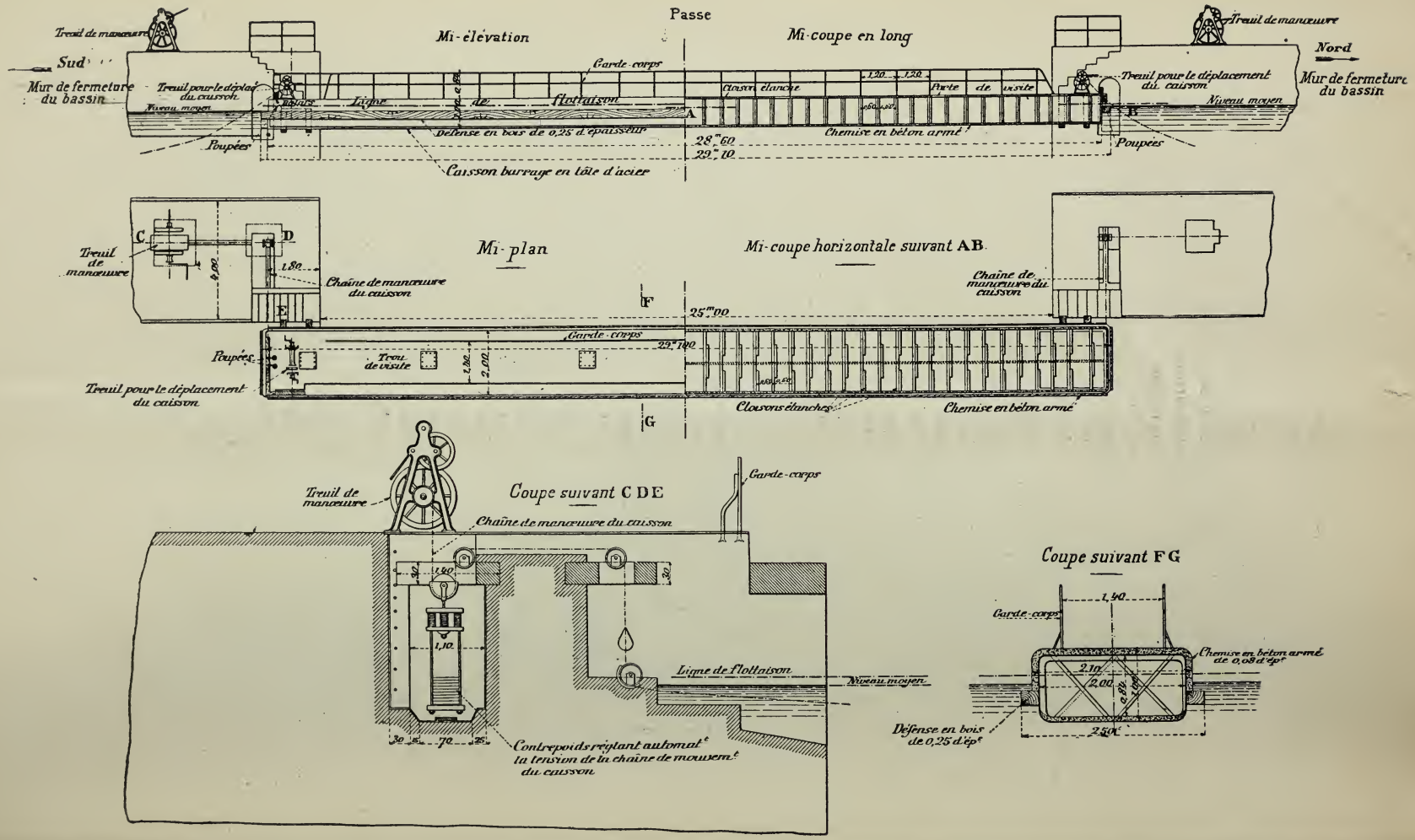


Fig. 2. — Barrage isolateur du bassin à pétrole

Pour assurer l'isolement du côté de l'eau, il suffira de placer un barrage flottant en travers de la passe d'entrée du bassin. Le barrage projeté à cet effet est représenté par la figure 2 ; il sera constitué par un caisson parallélipipédique en tôle d'acier, à angles arrondis, de 28^{m}60 de longueur 2 mètres de largeur et 0^{m}92 de hauteur; les membrures, espacées de 0^{m}60 d'axe en axe, seront composées chacune d'un cadre et de deux croisillons en cornières ; les parois verticales du caisson seront protégées contre les chocs par une défense en bois de 0^{m}25 d'épaisseur, disposée entre deux cours de cornières rivées à la tôle un peu au-dessous de la ligne de flottaison; le caisson sera divisé, en outre, en six compartiments par cinq cloisons transversales étanches, en vue de l'empêcher de couler à fond dans le cas où une voie d'eau se déclarerait soit à la suite d'un accident, soit pour toute autre cause ; le pont et les côtés du caisson au-dessus de la défense seront recouverts d'une chemise en béton armé de 0^{m}08 d'épaisseur ayant pour but de soustraire la tôle aux déformations pouvant résulter de l'action directe du feu dans le cas où du pétrole enflammé se répandrait à la surface de l'eau ; enfin, à l'intérieur du caisson, le fond sera cimenté jusqu'au niveau du bord des cornières afin de garantir la tôle contre l'oxydation. Le pont du caisson se trouvera à 0^{m}45 environ en contrehaut du niveau de l'eau ; il permettra, lorsque le barrage sera en place, de se rendre d'un côté à l'autre de la passe pour les besoins du service; un garde-corps placé de chaque côté facilitera la circulation du personnel.

Lorsque la passe sera ouverte, le barrage sera remisé le long de la branche nord du mur de fermeture du bassin à pétrole. Pour l'amener de cette position à la position précédente ou inversement, il suffira d'un simple mouvement de va-et-vient que l'on opèrera au moyen de chaînes et d'amarres convenablement disposées ; les hommes chargés de la manœuvre s'aideront, s'il y a lieu, du treuil à bras placé à chaque extrémité du pont du caisson.

Pour tenir le barrage en travers de la passe, on a adopté le dispositif suivant, qui maintiendra ses extrémités appliquées contre le parement intérieur du mur de fermeture, tout en lui permettant de suivre les fluctuations du niveau de la mer ; une chaine partant d'un crochet fixé à chaque extrémité du caisson se dirigera, en passant sur des poulies placées à l'intérieur d'évidements ménagés dans la maçonnerie de la branche correspondante du mur de fermeture, jusqu'à un treuil à bras installé sur le couronnement dudit mur ; sur le parcours de cette chaîne, entre deux poulies fixes, une poulie mobile supportera un contrepoids qui règlera automatiquement la tension de la chaîne.

Afin d'éviter que la défense du caisson ne s'use rapidement en frottant contre la maçonnerie, on scellera contre le parement de celle-ci des pièces verticales en bois contre lesquelles la défense viendra porter.

La manœuvre nécessaire pour détacher le barrage est facile à comprendre: Il suffira de mollir la chaîne au treuil jusqu'à ce que le contre-poids repose sur le fond du puits où il sera placé et de décrocher ensuite la chaîne à son

point d'attache avec le caisson ; on fera la manœuvre inverse pour rattacher le barrage.

Les installations du bassin à pétrole comporteront également :

Un pavillon pour les gardiens, comprenant : une cuisine, un réfectoire, un poste de couchage et une chambre pour le chef surveillant ;

Un pavillon pour la douane ;

Un pavillon pour les équipages des navires pétroliers, comprenant : une cuisine et un réfectoire ;

Et, de plus, neuf grues mues électriquement pour le chargement et le déchargement des barils de pétrole.

La Chambre de Commerce a soumis à l'approbation de l'Administration supérieure un projet ayant pour objet la construction du bassin, du barrage et des bâtiments ci-dessus décrits et dont le montant s'élève à 45.000 francs. Elle prend cette dépense à sa charge et assurera l'entretien et le fonctionnement des diverses installations moyennant la continuation de la perception à son profit des taxes existantes sur les pétroles embarqués ou débarqués.

La Commission des Ports ayant accepté le projet de la Chambre de Commerce, les travaux sont actuellement en pleine voie d'exécution et ne tarderont pas à être terminés.

PEYRIN Raoul,

Élève par correspondance de l'École.

Murs de quais maritimes de Rouen (1)

Murs de quais. — Le type de mur de quai admis à Rouen, sur la Seine, en aval du pont Boïeldieu, est appliqué dans ce port depuis 1879 et a donné entière satisfaction (*fig.* 1.)

Le croquis ci-contre dispense de toute description.

Nous nous bornerons à indiquer les détails des travaux de construction.

Les travaux sont exécutés dans l'ordre suivant :

Préparation du terrain.

Fondations.

Construction dans les caissons de la partie basse du mur.

Jonctions entre les caissons.

Construction de la plateforme de contre-mur.

Pose des tirants d'ancrage et construction des massifs.

---

(1) Bien que le type de mur de quai de Rouen soit classique, nous avons cru devoir publier la présente note qui renferme quelques détails intéressants au sujet de l'exécution des travaux (N D L R).

Achèvement de la maçonnerie du mur.
Pose du couronnement en granit et des bornes d'amarrage.
Construction du contre-mur.
Remblai sur le contre-mur et règlement du terre-plein
Empierrement du terre-plein.

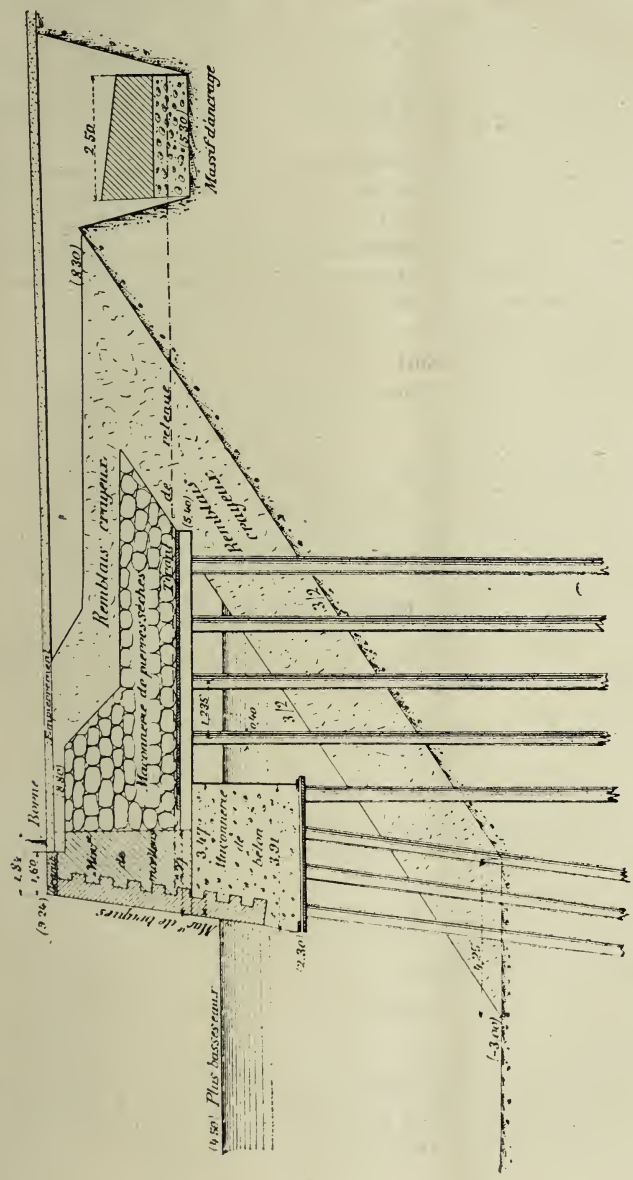


Fig. 1. — Coupe en travers d'un mur

Préparation du terrain. — La préparation du terrain consiste en terrassements au-dessus de la cote (6,40) par rapport au zéro des cartes marines au Havre, et en dragages au-dessous de cette cote jusqu'à (—3,00) pour régler le talus de la rive qui doit recevoir un revêtement en remblais crayeux ; puis dans l'exécution de ce revêtement qui a $11^{m}30$ de hauteur, de la cote (— 3,00) à la cote (8,30), et $4^{m}25$ d'épaisseur (mesurée horizontalement) avec un talus de 3 mètres de base pour 2 mètres de hauteur.

Le revêtement en remblais crayeux doit avoir été terminé depuis au moins deux mois avant que l'on puisse y battre les pieux, de manière à obtenir un tassement aussi satisfaisant que possible.

Fondations. — Les fondations sont constituées par des pieux de hêtre de $0^{m}40$ de diamètre battus par files transversales espacées de $1^{m}235$ d'axe en axe ; les pieux sont battus au moyen de sonnettes roulant sur un pont de service supporté par trois files longitudinales de pieux (non indiquées au dessin), dont celle du large seule doit être arrachée, les pieux des autres files sont recépés.

Les pieux sont au nombre de 8 par file; on commence le battage par les pieux les plus près de terre.

Le battage est arrêté lorsque l'enfoncement est inférieur à $0^{m}05$ pour une volée de 15 coups d'un mouton automoteur Lacour de 1.500 kil. tombant de $1^{m}20$ de hauteur au moins.

On compte environ une heure pour la mise en place et le battage d'un pieu y compris le déplacement de la sonnette.

Les pieux du large (pieux du mur proprement dit) sont recépés à la cote (2,30) ; les autres pieux (supportant le contre-mur) sont arasés à la cote (5,40).

Pour le recépage des premiers, on emploie une scie à ruban animée d'un mouvement alternatif, reposant sur un chariot roulant sur des rails maintenus à un niveau invariable et fixés sur le pont de service. (Nous parlerons, plus en détail, de la scie à recéper, au paragraphe suivant à la fin de la présente note.

Le recépage d'un pieu demande de une heure à une heure et demie, y compris la recherche du pieu et le déplacement de la scie.

Les pieux de contre-mur se recèpent à marée basse avec le passe-partout manœuvré par deux hommes qui peuvent scier 5 pieux en 3 heures.

La vérification du recépage des pieux de mur se fait avec l'aide d'un scaphandrier qui place la mire en quatre points différents de la tête de chaque pieu.

Les caissons en charpente sont étanches ; leurs parois sont amovibles. Ils reposent sur les pieux du large.

Caissons. — Les caissons sont amenés en place et l'on commence la construction du mur.

Pour les échouer, on les place dans des guides solidement fixés sur le pont de service ; ils s'échouent d'eux-mêmes à la marée descendante ; on continue ensuite les maçonneries jusque vers la cote (6,40).

Le mortier du béton est dosé à raison de 400 kilogs de ciment portland par mètre cube de sable.

Les parois des caissons ne peuvent être enlevées que dix jours au moins après l'achèvement du béton.

Jonctions. — On pose alors le plancher et le coffrage de la jonction entre le mur ancien et le nouveau; ce travail est fait par un scaphandrier. Le béton y est coulé au moyen de trémies. Le mortier de ce béton est dosé à 600 kilogrammes de ciment (au lieu de 400 kilogrammes). On profite des marées les plus basses pour moins délaver le béton ; comme pour les parois des caissons, le coffrage ne peut être enlevé que dix jours au moins après le coulage du béton.

Plateforme de contre-mur. — La plateforme de contre-mur repose sur les quatre files de pieux du côté de la berge et sur une retraite du mur ; elle se fait à marée basse ; les chapeaux sont fixés sur les pieux par des broches barbelées de $0^{m}50$; sur ces chapeaux, des madriers de $0^{m}12$ sont fixés par des broches de $0^{m}250$.

Tirants d'ancrage. — Les tirants d'ancrage sont boulonnés d'une part à une griffe fixée dans le mur et d'autre part à une seconde griffe que l'on noie dans un massif de béton et moellons de 25 mètres cubes construit dans le terre-plein des quais. Ces tirants sont espacés de $10^{m}50$.

Achèvement du mur. — On achève la maçonnerie du mur en laissant tous les $10^{m}50$ un trou de $0^{m}50$ de diamètre pour la pose des bornes d'amarrage ; au droit de ces trous, la maçonnerie est renforcée de $0^{m}46$ sur 2 mètres de largeur.

Pose du couronnement et des bornes. — Avant de poser les bornes, il faut mettre en place le couronnement contre lequel les bornes sont alignées ; on remplit alors de sable les trous des bornes et l'on termine le remplissage par une couronne en béton de $0^{m}15$ d'épaisseur.

Contre-mur. — Le contre-mur se fait en pierres sèches posées à la main sur la plateforme dont il est parlé plus haut. On peut commencer à charger la plateforme dès que les tirants d'ancrage sont en place.

Remblai sur le contre-mur et empierrement. — Sur le contre-mur, le remblai est crayeux sur un mètre d'épaisseur ; on règle le terre-plein suivant la pente prévue et l'on y répand une couche de pierre cassée de $0^{m}25$ d'épaisseur que l'on cylindre.

Prix de revient. — Le mètre linéaire de mur de quai, y compris la confection du terre-plein, est inférieure à 3.000 francs.

Les quais peuvent supporter une surcharge de 6 tonnes par mètre carré de terre-plein.

Scie à recéper. — La scie à recéper employée sur les chantiers de Rouen est du système Perdriel (*fig.* 2).

Elle se compose d'un plancher P, supporté par deux essieux, dont les roues permettent le roulement de tout l'appareil sur le pont de service. Deux montants B sont fixés sur ce plancher et supportent la scie proprement dite.

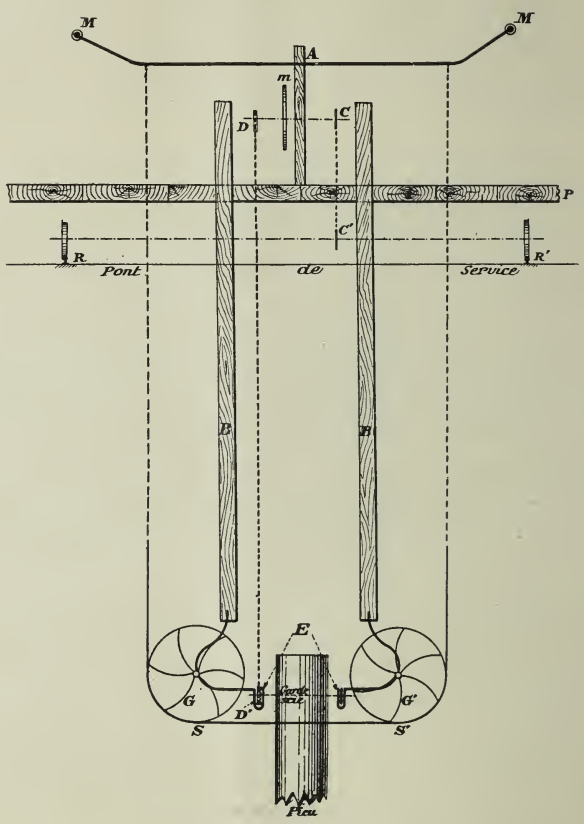


Fig. 2. — Scie à recéper les pieux

La barre de manœuvre MM, mobile autour du point A, permet de donner à la scie SS' un mouvement de va-et-vient par l'intermédiaire des roues G G'.

La manivelle *m* fait tourner la roue dentée C qui communique son mouvement à une autre roue dentée C' par l'intermédiaire d'une chaîne ; la roue C' étant fixée sur l'essieu prenant appui sur le plancher, il en résulte que tout l'appareil se déplace sur les rails R.

Une autre roue dentée D, placée sur l'arbre de la manivelle *m*, transmet son mouvement à la roue dentée D' qui le communique à son tour à deux autres pignons E E' sur lesquels se trouve une chaîne permettant d'y fixer le garde-scie.

En fixant plus ou moins haut les montants B sur le plancher, on peut faire varier facilement le plan de recépage.

Cette scie donne de bons résultats tout en étant d'un fonctionnement et d'une construction assez simples.

HOUETTE et MONSANGLANT,
Commis des Ponts et Chaussées

Confection des pilotis en béton

La confection des pilotis en béton comprend trois opérations :

1° Mise en place de la sonnette ;

2° Battage des tubes ;

3° Confection du pieu en béton.

1° **Mise en place de la sonnette.** — Les mouvements qu'on peut imprimer à une sonnette, montée sur deux rouleaux (1), sont de trois sortes :

1° *Mouvement direct avant ou arrière* — Ce mouvement se fait uniquement à bras d'homme par une action directe sur les rouleaux de supports au moyen de pinces ;

2° *Déplacement latéral.* — Cette opération se fait avec la machine du treuil et par l'intermédiaire de moufles à crochets fixées à l'extrémité des rouleaux.

3° *Rotation de la sonnette.* — Cette opération exige au préalable la confection d'un pivot sur lequel la sonnette pourra reposer et ensuite tourner sous l'action de la machine et par l'intermédiaire des moufles.

Ce pivot peut être obtenu au moyen de madriers assez solides entrecroisés à angle droit. La dernière couche de madriers reposera sur des pinces ou des gros fers ronds qui permettront le mouvement de rotation.

Ce pivot doit, en outre, être construit de telle façon qu'il supprime tout contact des sabots de roulement de la sonnette avec les rouleaux sans toutefois dégager ceux-ci entièrement.

Les moufles à crochets seront également placées aux extrémités des rouleaux, mais de part et d'autre de la sonnette.

---

(1) Il existe des sonnettes dans lesquelles les mouvements d'avancement et latéraux sont réalisés par deux groupes de galets agissant sur deux plate-formes (N. D. L. R.).

Dans toutes ces opérations, il faut placer des hommes aux quatre haubans qui maintiennent la sonnette en équilibre et imprimer à ces haubans les mouvements correspondant aux déplacements de la sonnette.

Nous indiquons ci-après comment ces trois mouvements sont réalisés.

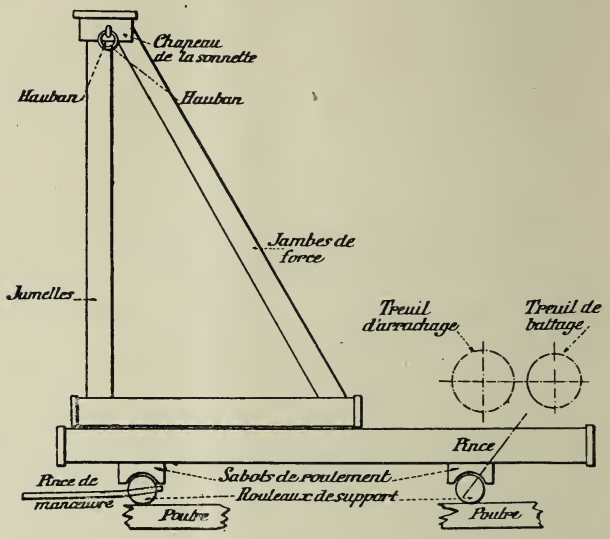


Fig. 1. — Élévation latérale

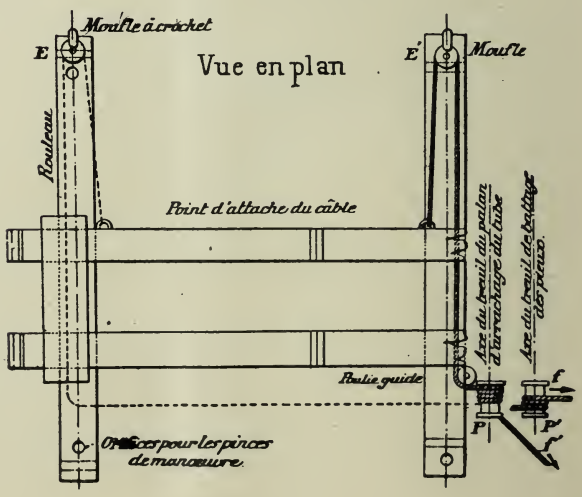


Fig. 2

1° *Mouvement direct avant ou arrière.* Les rouleaux de support reposent sur des poutres en bois placées dans le sens perpendiculaire à la direction des génératrices des rouleaux. Le croquis ci-contre (*fig.* 1) suffit pour se rendre compte de la façon d'obtenir le mouvement désiré.

2° *Déplacement latéral.* — Les poulies P et P' tournent sous l'action de la machine. Deux hommes placés respectivement en *f* et *f'* maintiennent le câble tendu sur la poulie qui, en tournant, l'enroule autour d'elle et provoque le déplacement latéral par l'intermédiaire des moufles E, E' (*fig.* 2) ;

3° *Mouvement de rotation de la sonnette.* — Le dispositif de la manœuvre est analogue au précédent ; seulement les moufles à crochet, au lieu d'être placées du même côté de la sonnette, se placent de part et d'autre.

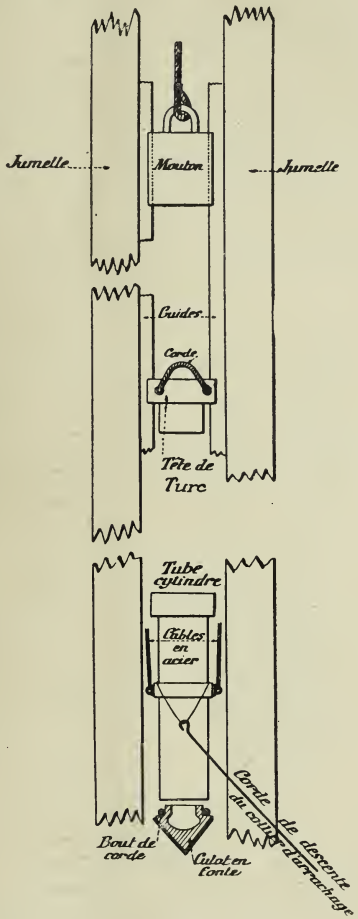


Fig. 3

2° **Battage des tubes.** — Lorsque la sonnette est mise en place, on procède au battage des tubes. Cette opération comprend les manœuvres suivantes :

1° Mettre en place le culot d'enfoncement ;

2° Descendre le cylindre de battage pour le faire reposer sur le culot ;

3° Décrocher le mouton de sa position de repos ;

4° Descendre la tête de turc pour la faire reposer sur le cylindre de battage ;

5° Descendre le collier d'arrachage ;

6° Soulever le mouton à une hauteur de trois mètres environ au-dessus de la tête de turc au moyen du treuil mû par la machine, puis le laisser retomber sur la tête de turc, et ainsi de suite ;

7° Continuer le battage jusqu'à ce qu'on ait obtenu le refus voulu. Le refus est la quantité dont s'enfonce le tube sous l'action d'un ou de plusieurs coups de mouton. On le prend généralement pour cinq coups de mouton.

8° Le refus voulu étant obtenu, arracher le tube au moyen d'un palan avec câble en acier s'enroulant sur un treuil et après avoir placé le mouton et la tête de turc à la position de repos, près du chapeau de la sonnette (*fig.* 3).

3° **Confection des pieux.** — Le tube étant enfoncé au refus voulu, on confectionne le pilotis proprement dit en béton.

Deux cas peuvent se présenter :

Premier cas. — Le terrain ne contient pas d'eau ayant une action destructive sur le béton ;

Deuxième cas. — Le terrain contient des eaux qui attaquent le béton et le réduisent en bouillie.

Premier cas. — Après avoir enfoncé le tube jusqu'au refus, on le retire de un mètre environ.

On coule alors du béton dans l'intérieur du tube et on dame ce béton. Le béton est monté dans une benne mue par la machine et le damage se fait au moyen d'un pilon également mu par la machine. On continue l'opération de la même façon jusqu'à ce que le pieu soit terminé (*fig.* 4).

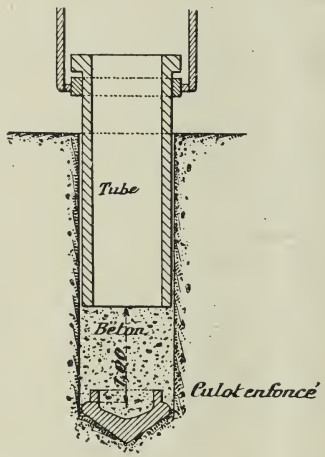


Fig. 4

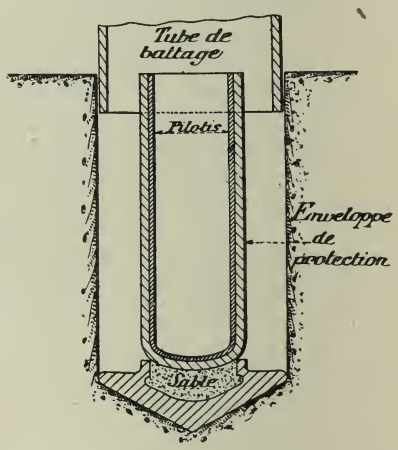


Fig. 5

Deuxième cas. — Il faudra, dans ce cas, placer le pilotis dans une enveloppe métallique qui ne soit pas attaquée par les eaux. Cette enveloppe aura une forme cylindrique. Son diamètre extérieur sera inférieur au diamètre intérieur du tube.

Elle sera constituée par deux parois métalliques distinctes fermées à l'une des extrémités (*fig.* 5).

La paroi extérieure protège contre les eaux. La paroi intérieure protège l'enveloppe extérieure contre les coups de pilon pendant la confection du pieu.

Dans le présent cas, les opérations sont les suivantes :

1° Verser dans le creux du culot en fonte un peu de sable sur lequel viendra reposer l'enveloppe de protection;

2° Descendre l'enveloppe de protection à l'intérieur du tube, la faire reposer sur le culot en fonte ;

3° Descendre le pilon de damage à l'intérieur de cette enveloppe pour la maintenir en position pendant l'opération ;

4° Arracher le tube de battage ;

5° Le tube étant arraché, enlever le pilon de damage, verser un peu de béton pour le remplacer, puis déplacer la sonnette;

6° Damer le béton du pieu à la main. Verser le béton par couches successives et en même temps un peu de sable extérieurement autour de l'enveloppe pour remplir le vide laissé entre elle et l'empreinte du tube de battage.

C. HIRT,
Ingénieur de travaux.

Le monorail Brennan

La *Nature* et le *Cosmos* relatent, dans leur numéro du 11 décembre, les essais du monorail Brennan qui ont eu lieu le 10 novembre dernier, à Gillingham (atelier de construction des torpilles Brennan, près de Chatham).

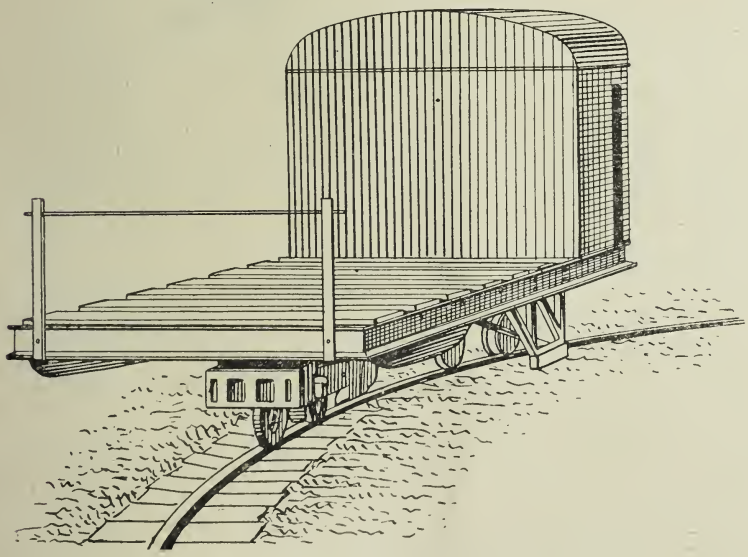


Fig. 1. — Voiture monorail Brennan (vue de l'arrière).

La voiture Brennan expérimentée, a 12m20 de longueur et 3m05 de largeur ; son poids à vide est de 22 tonnes ; elle peut porter une charge de 10 à 15 tonnes ; elle repose sur deux bogies d'un empattement total de 6m10. Chaque bogie se compose de deux roues à gorge de 0m915 de diamètre, écartées de 1m625, disposées dans l'axe longitudinal de la voiture.

La voie est constituée par un rail Vignole de 31 kg. 5 par mètre ; elle présente des courbes dont le rayon descend jusqu'à 10 mètres (*fig.* 1 et 2).

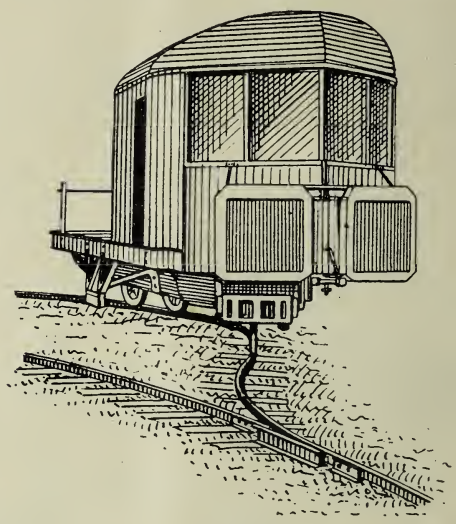


Fig. 2. — Voiture (vue de l'avant) dans une courbe.

La force motrice est donnée par deux groupes pétroléo-électriques d'une puissance respective de 80 et 20 chevaux (le moteur de 20 chevaux a été seul utilisé aux essais). Les deux groupes sont placés dans une cabine à l'avant du véhicule.

La stabilité du véhicule est obtenue au moyen de deux gyroscopes placés aussi dans la cabine d'avant. Ces gyroscopes (*fig.* 3) ont des volants d'environ 1 m. de diamètre pesant 750 kilos, tournant tous deux, mais en sens inverse, autour d'axes situés normalement en prolongement l'un de l'autre et perpendiculairement à la direction du rail. La vitesse de rotation des roues est de 3.000 tours par minute ; elle est produite par deux moteurs dont les inducteurs (excités en dérivation) sont fixés au châssis du gyroscope ; leurs induits sont montés sur l'arbre qui porte le volant. Quand la voiture est en équilibre, les moteurs des gyroscopes n'ont à produire que le travail nécessaire pour vaincre les frottements ; pour le diminuer, les moteurs et gyroscopes tournent dans une caisse fermée presque vide d'air (pression de 12 à 15 m/m de mercure) ; un système de lubrification forcée

refroidit l'huile au moyen de radiateurs avant de la refouler à nouveau dans les conduites. Notons que si le courant est coupé, les roues, montées sur billes, peuvent encore tourner pendant des heures sans diminution notable de vitesse : les voyageurs auraient donc largement le temps de descendre du gyrotrain si sa stabilité venait à être mise en péril.

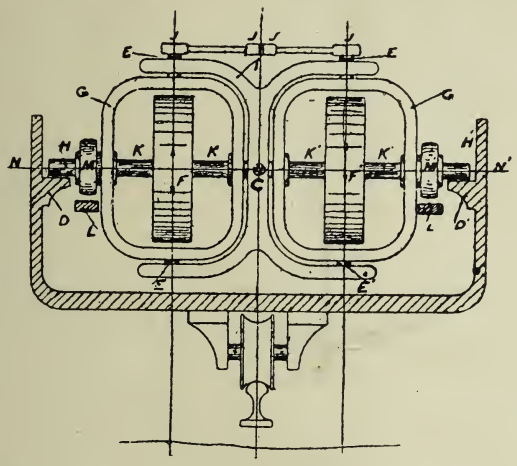


Fig. 3. — Élévation schématique des gyroscopes Brennan.

Aux essais — groupe de 20 chevaux fonctionnant seul — la vitesse de la voiture a été de 12 kilomètres ; des rampes de 7 % ont été gravies ; la stabilité dans divers cas de surcharge a été parfaite.

L'inventeur affirme que son monorail pourra marcher à 260 kilomètres à l'heure et franchir des rampes de 14,5 %.

Une théorie très élémentaire de l'action stabilisatrice du gyroscope est donnée dans le « Cosmos » ; elle est trop longue pour que nous la reproduisions ici.

Notons, en terminant, que les essais du monorail Brennan ont été hâtés par l'apparition, à Berlin, du monorail Scherl également pourvu de gyroscopes.

L. Ludinart.

Prix des ouvrages en béton armé

Les constructeurs spécialistes en béton armé se plaignent souvent de la routine des ingénieurs en ce qui concerne l'emploi du nouveau mode de construction. Ils n'ont pas tous les torts, je le reconnais, et les Compagnies

françaises de chemins de fer qui ne veulent pas essayer en grand les traverses et les ponts sous rails en béton armé, sont encore plus routinières à cet égard que les Administrations de Travaux publics.

Mais les constructeurs oubliant trop facilement que si les ingénieurs n'emploient pas beaucoup le béton armé, c'est qu'ils le font payer trop cher. Et je ne cache pas qu'à prix égal, je préfère, dans les circonstances habituelles, un pont en maçonnerie à un pont en béton armé. On sait ce que donne la maçonnerie ; on préjuge que le béton armé durera aussi longtemps mais ce n'est là qu'une présomption. De plus, raison importante, on fait travailler le béton et le fer à un taux élevé : avec un coefficient de sécurité beaucoup moindre que pour la maçonnerie et les ouvrages métalliques ; il faut donc une exécution parfaite, beaucoup plus parfaite que pour la maçonnerie et, malgré cela, si le poids des surcharges augmente, on sera obligé de renforcer un pont en béton armé, ce qu'on évite avec un pont en maçonnerie.

Enfin, malgré tous les sophismes développés à cet égard, les ponts en béton armé construits jusqu'à ce jour sont incontestablement laids : ce sont des squelettes qui n'ont que la forme et sont dépourvus de toute l'apparence plastique à laquelle nous ont habitués, depuis toujours, les artistes et les Ingénieurs. Et ces formes plastiques seront, quoiqu'on en dise, toujours inséparables de la beauté ; on ne conçoit pas un beau marbre ou un beau bronze sans elles, et si les ingénieurs s'écartent là-dessus de la conception des artistes, laquelle est d'ailleurs une imitation de la nature, ils produiront toujours du laid.

Les ponts métalliques partagent également, et souvent à un plus haut degré, la laideur du béton armé ; ainsi, nous ne comprenons pas que ce genre de construction soit toujours aussi employé ; cet emploi, pour les ouvrages courants et hors les cas spéciaux est tout à fait injustifié.

En résumé, le béton armé n'a pas tous les succès auquel on pourrait s'attendre pour trois motifs.

1° La routine des constructeurs ;

2° La plus belle esthétique des ouvrages en maçonnerie ;

3° Son prix de revient.

Notre but est surtout d'insister sur ce dernier motif, le prix de revient.

J'ai vu des constructeurs demander ce qu'on peut appeler des prix scandaleux : 0 fr. 70 et 0 fr. 80 pour l'acier, où il n'y a que des mains d'œuvre de ployage, alors que pour les charpentes rivées, on paie seulement 0 fr. 40 à 0 fr. 45. Le béton était évalué à 60 francs le mètre cube, alors qu'il coûtait sur place 30 fr. Bref, le mètre cube de béton armé posé revenait à 160 et 180 francs, tandis que pour arriver à des prix réellement plus faibles que ceux des autres modes de construction, il ne faudrait pas dépenser 100 fr. à 120 francs le mètre cube.

On connaît aisément le prix d'un mètre cube de béton de ciment ; l'acier, au cours actuel de 22 francs, peut valoir, cintré et posé, 0 fr. 30 le kilogram. Reste la question de la main-d'œuvre. M. Ferrieu, ingénieur des Ponts et

Chaussées, qui vient de faire construire un pont sur le Cher, à Vallon-en-Sully, a fait faire à cet égard des relevés intéressants, dont nous donnons ci-dessous un résumé, emprunté au journal *le Béton armé*, de juin 1909 :

DÉSIGNATION DES PARTIES D'OUVRAGE	QUANTITÉS	TEMPS NÉCESSAIRE		OBSERVATIONS
		total	par m. c. ou 100 kg.	
Béton de ciment (au-dessus des naissances)	185 m. c.	2.100 h. 1.240 h.	11 h. 35 6 h.70	Fabric. et bardage Pose et pilonn.
Armatures	18.000 kg.	720 h.	4 h. (1)	Façon et pose.
Coffrages (par mètre cube de béton)	185 m. c.	2.780 h.	15 h.	Façon et pose.

Il résulte de ce relevé qu'un mètre cube de béton armé avec pourcentage de 2 % en place peut être évalué ainsi :

Béton à 300 kilog. de ciment	25 »
Pose et pilonnage, 7 heures à 0 fr. 40	2 80
Fers, 160 kilog., étriers compris à 0 fr. 25	40 »
Pose, 9 heures par 100 kilog., soit 5 fr. 40 ; pour 160 kil.	8 60
Coffrage : 15 heures à 0 fr. 60	9 »
TOTAL	85 40
Location de bois pour coffrages : très variable ; on peut compter pour un hourdis horizontal, 1 mètre cube à 20 francs	20 »
Outils, assurance, faux-frais et bénéfices, 15 %	15 60
Prix du mètre cube	121 »

Ce prix de 121 francs est déjà élevé et ne peut pas toujours soutenir la comparaison avec les prix de revient de la maçonnerie ordinaire. C'est ainsi qu'une dalle pour aqueduc de $0^{m}15$ revient rarement à plus de 10 fr. le mètre cube, tandis qu'en béton armé et de $0^{m}10$ d'épaisseur, elle reviendrait à 12 fr. 10.

(1) Cette main-d'œuvre ne comprend pas la façon des étriers : d'après les constatations faites sur un ouvrage exécuté directement par nos soins, on peut évaluer cette main-d'œuvre à 5 heures par 100 kg., soit un total de 9 heures.

3 0112 077581657

Néanmoins, les prix de 100 à 120 francs peuvent être souvent avantageux, tandis que des prix plus élevés sont le plus souvent prohibitifs, et empêchent les ingénieurs d'envisager sérieusement un emploi étendu du nouveau mode de construction.

Avis aux constructeurs spécialistes en béton armé.

Pour terminer, nous ne pouvons nous empêcher de faire remarquer que le pont en béton armé de Vallon-en-Sully à deux arches de 29 mètres d'ouverture et 3 mètres de flèche, calculé comme encastré à chaque retombée ves arcs, s'est comporté aux épreuves comme une poutre à travées solidaires, de qui était à prévoir, en raison de la continuité du tablier.

Ch. Aubry,
Ingénieur des Ponts et Chaussées.

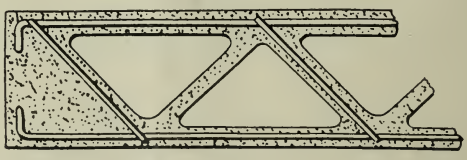
REVUE DES PUBLICATIONS PÉRIODIQUES

NOUVELLES ANNALES DE LA CONSTRUCTION

Octobre 1909. — **Poutre à treillis en béton armé système Visintini.** — (Bousquet).

Un des inconvénients du béton armé est d'exiger des sujétions fort nombreuses et très coûteuses pour l'établissement des coffrages et des poteaux qui les supportent.

Dans le but de s'affranchir de ces sujétions, on a essayé d'exécuter à l'avance à l'atelier des pièces en béton armé. Les partisans de ce procédé font valoir que la fabrication à l'atelier peut être rendue plus économique que le moulage sur chantier, qu'il est facile d'éprouver les pièces à l'avance et qu'enfin la mise en place est beaucoup plus rapide.



M. Franz Visintini, ingénieur-architecte à Vienne (Autriche), a créé un système de poutre en béton armé affectant la forme d'une poutre métallique à treillis et possédant les qualités communes à tous les systèmes de béton